AMABIS E MARTHO
BIOLOGIA DAS POPULAÇÕES
3
Genética
Evolução biológica
Ecologia
Moderna

BIOLOGIA DAS POPULAÇÕES

Genética

Evolução biológica

Ecologia

José Mariano Amabis

Professor Doutor
do Departamento de Biologia do
Instituto de Biociências da USP

Coordenador de Educação
do Centro de Estudo do
Genoma Humano da USP

Gilberto Rodrigues Martho

Licenciado em Ciências
Biológicas pelo Instituto
de Biociências da USP

3

ENSINO MÉDIO

2ª edição

Moderna

APRESENTAÇÃO

Prezado estudante

A área de Genética avançou muito no século XX; entre tantas descobertas, elucidou-se a natureza do material hereditário — o DNA — e decifrou-se o mecanismo da codificação genética. Os avanços da Biologia Molecular permitiram compreender melhor os conceitos básicos da herança e da evolução da vida. No século XX houve também grande desenvolvimento da Ecologia, com participação popular cada vez maior nas questões que envolvem o ambiente em que vivemos. São esses os principais temas tratados neste volume, **Biologia das Populações**, em que apresentamos os conceitos clássicos de Genética à luz dos novos conhecimentos nas áreas da Biologia Molecular e da Engenharia Genética. Na segunda parte do volume, apresentamos os princípios da evolução biológica, tema que ultrapassa as fronteiras da Biologia e leva à reflexão sobre a origem de nossa espécie. A última parte trata dos conceitos básicos em Ecologia e dos desafios enfrentados pela humanidade para preservar o ambiente terrestre.

Embora fascinante, o aprendizado da Biologia não deixa de ser um desafio para o estudante: são muitos os conceitos e processos a serem aprendidos, o que exige dedicação e paciência. Sugerimos que você leia o texto com cuidado, analisando detalhadamente as ilustrações e suas legendas; faça as atividades propostas e teste seus conhecimentos; reveja os conceitos sempre que tiver dúvida, contando para isso com a ajuda do índice remissivo, apresentado ao final do livro.

Temos certeza de que seus esforços serão recompensados. Você se sentirá mais seguro e preparado para suas provas e exames e passará a dominar conhecimentos sobre a natureza da vida, cada vez mais importantes para o exercício da cidadania e para a preservação de um ambiente terrestre habitável, do qual todos nós dependemos.

Esperamos que este livro ajude você a descobrir por que a Biologia é uma das ciências mais destacadas e promissoras do século XXI.

Os Autores

Agradecimentos

Agradecemos a todos os que participaram da elaboração desta nova edição da obra *Biologia das Populações*, em especial a:

Ricardo Seballos, por suas decisões, cronogramas e confiança em nosso trabalho;

José Luiz Carvalho da Cruz, pela coordenação e boas sugestões no acompanhamento do projeto;

Elena Versolato, pelo trabalho editorial dedicado, criterioso e paciente;

Silvana Cobucci Leite, Iraci Miyuki Kishi, Renato da Rocha e Célia Tavares pela competente preparação de texto e por tantas boas sugestões;

Sandra Botelho de Carvalho Homma e Marta Cerqueira Leite, pelo projeto gráfico e capas de bom gosto;

Wilson Gazzoni Agostinho, pela coordenação da edição de arte;

Adilson Secco, Cecilia Iwashita e Jurandir Ribeiro, pelas novas ilustrações;

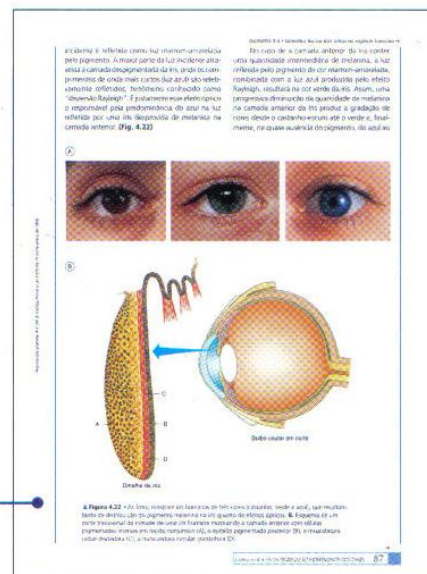
Vera Lucia da Silva Barrionuevo, pela seleção das fotos;

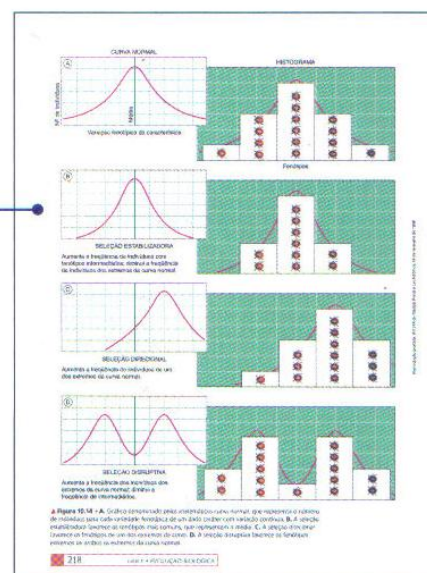
Nelson Matsuda e pessoal da Setup Bureau, pelos trabalhos de diagramação e editoração;

Estevam Vieira Lédo Jr. e equipe, pelo cuidadoso trabalho de revisão;

Profª Drª Blanche Christine Bitner-Mathé, pela leitura e sugestões nas partes de Genética e de Evolução Biológica.

Profª Daniela Manzutti Parice e Profª Tereza Amorim Costa, que colaboraram na seleção das questões de A Biologia no Vestibular.

ORGANIZAÇÃO DIDÁTICA

Texto amplamente ilustrado.
As fotos e ilustrações integradas didaticamente ao conteúdo ajudam a aprendizagem dos conceitos.

Quadros temáticos complementam o desenvolvimento do tema em estudo. Abordam aspectos históricos, modernos ou de aplicação prática dos conceitos estudados.

DOS CAPÍTULOS

Atividades referentes ao conteúdo do capítulo, dimensionadas para promover a fixação e aplicação dos conceitos estudados, são organizadas em ordem crescente de dificuldade.

A Biologia no Vestibular apresenta uma seleção das melhores questões de exames vestibulares, das diversas regiões do país, sobre os assuntos tratados em cada capítulo.

Guia de Estudo, com diversas questões discursivas, permite rever, passo a passo, os principais assuntos do capítulo.

Questões para Pensar e Discutir, objetivas e discursivas, desafiam o leitor a relacionar fatos, conceitos e processos.

O **Índice Remissivo** permite localizar, com rapidez, as páginas em que determinado assunto é tratado no livro.

A seção **Leitura** apresenta textos extraídos de livros, revistas científicas, jornais ou internet, mostrando como temas estudados no capítulo são tratados em diferentes meios de divulgação científica.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 5 O mapeamento dos genes nos cromossomos, 96

CAPÍTULO 6 Herança e sexo, 112

CAPÍTULO 7 Do genótipo ao fenótipo: como se expressam os genes, 132

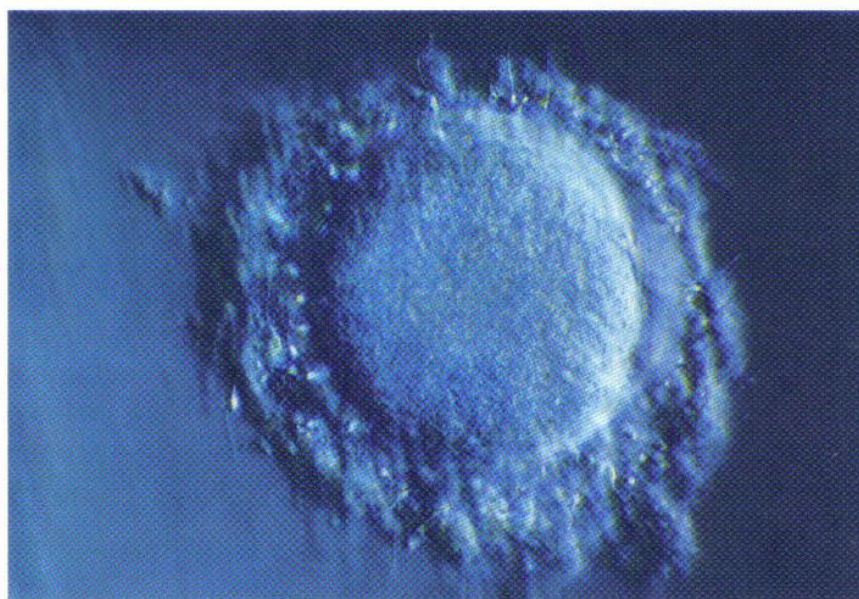
▼ Periquitos australianos com plumagens de diferentes cores.

PARTE I

GENÉTICA

CAPÍTULO

1 AS ORIGENS DA GENÉTICA

▶ Fotomicrografia ao microscópio óptico de um óvulo humano rodeado de espermatozóides (aumento ≃ 3000×).

1.1 Primeiras idéias sobre herança biológica

Genética é a área da Biologia que estuda a **herança biológica**, ou **hereditariedade**, que é a transmissão de características de pais para filhos, ao longo das gerações. Apesar de a herança biológica desafiar a curiosidade das pessoas desde a pré-história, a Genética desenvolveu-se de maneira expressiva apenas no século XX.

As primeiras idéias sobre hereditariedade eram provenientes do senso comum. Por exemplo, a partir da observação de que os filhos se assemelham aos pais, surgiu a idéia de selecionar, em plantas e animais, características de interesse pela escolha dos reprodutores que as apresentam. Esse conhecimento permitiu à humanidade produzir diversas variedades de animais e plantas domésticos, com características selecionadas para atender às nossas necessidades. **(Tab. 1.1)**

Os filósofos gregos e a hereditariedade

Os filósofos da antiga Grécia divergiam quanto às explicações para a hereditariedade. Alcmeon de Crotona, um discípulo de Pitágoras de Samos que viveu por volta de 500 a.C., acreditava que homens e mulheres tinham sêmen e que este se originava no cérebro; segundo ele, o sexo das crianças era determinado pela preponderância do sêmen de um dos pais, ocorrendo hermafroditismo se os dois estivessem em igual proporção. Segundo Empédocles de Acragas (492-432 a.C.), o calor do útero era decisivo na determinação do sexo dos bebês: útero quente produziria homens; útero frio, mulheres. Anaxágoras de Clazomene (500-428 a.C.) postulava que o sêmen ocorria apenas no homem e continha um protótipo de cada órgão do futuro ser; as fêmeas atuariam apenas como receptoras e nutridoras do ser pré-formado. Ele propôs também o que ficou conhecido como "teoria direita e esquerda", segundo a qual os meninos eram gerados no lado direito do corpo e as meninas, no lado esquerdo.

Tabela 1.1 • Algumas espécies de animais e plantas domésticos

Espécie domesticada	Espécie ancestral	Época da domesticação (anos atrás)	Local
Ovelha (*Ovis aries*)	Ovelha selvagem (*Ovis ammon*)	12.000	Iraque
Cão (*Canis familiaris*)	Lobo (*Canis lupus*)	12.000	Oriente Médio
Cabra (*Capra hircus*)	Cabra selvagem (*Capra hircus*)	10.000	Irã
Gato (*Felis catus*)	Gato selvagem (*Felis caffra*)	9.500	Chipre ou Egito
Porco (*Sus domesticus*)	Porco selvagem europeu (*Sus scrofa*)	10.000	Europa-Ásia
Cavalo (*Equus caballus*)	Cavalo selvagem (*Equus przewalskii*)	8.000	Irã
Marreco (*Anas platyrhynchus*)	Marreco selvagem comum (*Anas platyrhynchus*)	6.000	China
Camelo (*Camelus bactrianus*)	Camelo selvagem (*Camelus bactrianus*)	6.000-5.000	Egito
Jumento (*Equus asinus*)	Jumento selvagem (*Equus asinus atlanticus*)	5.000	Egito
Abelha (*Apis mellifera*)	Abelha (*Apis mellifera*)	4.500	Egito
Bicho-da-seda (*Bombyx mori*)	Bicho-da-seda (*Bombyx mori*)	4.500	China
Coelho (*Oryctolagus cuniculus*)	Coelho selvagem (*Oryctolagus cuniculus*)	4.500	Roma
Arroz (*Oryza sativa*)	Arroz selvagem asiático (*Oryza sativa*)	15.000	China central
Abóbora (*Cucurbita pepo*)	Abóbora (*Cucurbita pepo*)	12.000-10.000	Equador
Trigo (*Triticum monococcum*)	Trigo selvagem (*Triticum monococcum*)	9.800-9.500	Turquia
Milho (*Zea mays*)	Teosinto (provavelmente *Zea mexicana*)	8.000-7.000	México
Linho (*Linum usitatissimum*)	Linho selvagem (*Linum usitatissimum*)	9.000	Turquia-Curdistão
Lentilha (*Lens culinaris*)	Lentilha selvagem (*Lens culinaris*)	6.000	Egito
Azeitona (*Olea europaea*)	Azeitona (*Olea europaea*)	6.000	Oriente Médio
Feijão (*Phaseolus spp.*)	Feijão (*Phaseolus spp.*)	5.000-4.000	América Central e do Sul
Soja (*Glycine max*)	Soja (*Glycine max*)	4.000	China

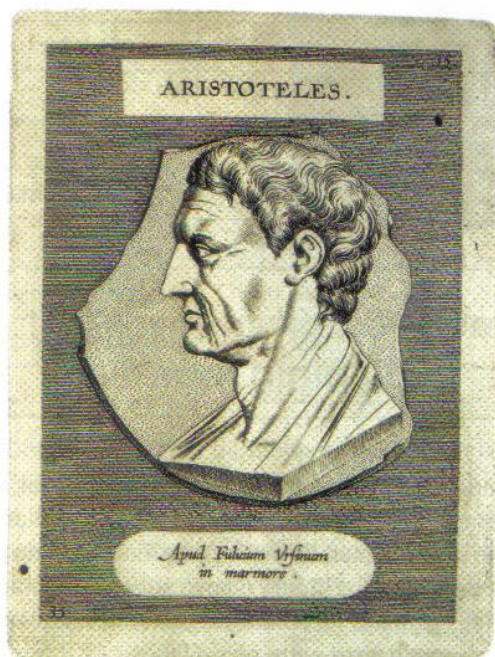
As idéias dos filósofos da Grécia antiga, principalmente as de Hipócrates e Aristóteles, exerceram forte influência sobre o pensamento ocidental a partir do Renascimento, período de mudanças radicais na cultura européia entre os séculos XIV e XVI, que marcou o fim da Idade Média e criou condições para o surgimento da ciência.

A pangênese de Hipócrates

Uma das primeiras hipóteses consistentes sobre herança biológica foi proposta por Hipócrates de Cos (460-370 a.C.), filósofo grego que ficou conhecido como o "pai" da Medicina. Segundo a hipótese de Hipócrates, denominada **pangênese**, cada órgão ou parte do corpo de um organismo vivo produzia partículas hereditárias chamadas de gêmulas, que eram transmitidas aos descendentes no momento da concepção. As gêmulas migravam para o sêmen do macho e da fêmea, sendo passadas para os filhos. Como o novo ser era elaborado a partir das gêmulas recebidas dos genitores, isso explicava as semelhanças entre pais e filhos.

A pangênese permitia explicar a herança de características adquiridas, crença que perdurou até o século XIX, tendo entre seus adeptos Jean-Baptiste Lamarck e o próprio Charles Darwin. Ao investigar a questão da hereditariedade, no século XIX, Darwin chegou à mesma conclusão que Hipócrates, adotando a teoria da pangênese e admitindo a herança de características adquiridas, o que mais tarde trouxe críticas à sua teoria da evolução.

Idéias de Aristóteles sobre hereditariedade

Aproximadamente um século depois de Hipócrates, o filósofo grego Aristóteles (384-322 a.C.) escreveu um tratado sobre o desenvolvimento e a hereditariedade dos animais. Nesse livro, intitulado *De generatione animalium* (Geração dos animais), ele distinguiu quatro tipos de geração: a) abiogênese (ou geração espontânea); b) brotamento (reprodução por formação de brotos); c) reprodução sexuada sem cópula; d) reprodução sexuada com cópula. Sobre a reprodução sexuada, Aristóteles acreditava que resultava de uma contribuição diferencial dos sexos: a fêmea fornecia a "matéria" básica que constituía e nutria o ser em formação, enquanto o macho fornecia, por meio do sêmen, a "essência", transmitindo-lhe a alma, fonte da forma e do movimento. Se o desenvolvimento do feto fosse normal, a forma paterna prevaleceria, ou seja, o novo ser seria semelhante ao pai. Se houvesse uma falha, o feto seria parecido com a mãe. Falhas maiores fariam prevalecer características dos avós e, sucessivamente, de ancestrais mais distantes, até o limite de ser gerado um ser inumano, um monstro. **(Fig. 1.1)**

▲ **Figura 1.1** • Aristóteles (384-322 a.C.) elaborou hipóteses pioneiras sobre a herança biológica. Suas idéias exerceram forte influência sobre o pensamento europeu a partir do Renascimento.

Em seus escritos, Aristóteles fez diversas críticas à pangênese de Hipócrates. A partir da observação de que as semelhanças entre pais e filhos não se restringem à estrutura corporal, mas podem abranger outras características como voz, jeito de andar e até mesmo comportamentos, Aristóteles questionava: como características não-estruturais produziriam gêmulas? Além disso, filhos de pais com cabelos e barbas grisalhos não são grisalhos ao nascer; filhos de homens que na meia-idade se tornarão calvos podem herdar a calvície precoce, mesmo quando nascem antes de o pai se tornar calvo. Sabia-se, também, que às vezes os indivíduos herdavam características presentes em ancestrais remotos e ausentes nos pais; se as características não estão presentes nos pais, como seriam produzidas gêmulas para elas? Esses e outros argumentos levaram Aristóteles a rejeitar a pangênese.

Da época de Aristóteles até o final do século XIX ocorreram poucos avanços nas idéias sobre a hereditariedade. Para explicar o fenômeno da herança biológica era preciso conhecer os princípios básicos da reprodução dos seres vivos, o que só ocorreu na segunda metade do século XIX. Até então, a maioria dos naturalistas ainda acreditava em geração espontânea (relembre no capítulo 2 do volume 1 desta coleção).

1.2 As bases da hereditariedade

Pré-formação *versus* epigênese

Primeiras idéias sobre fertilização

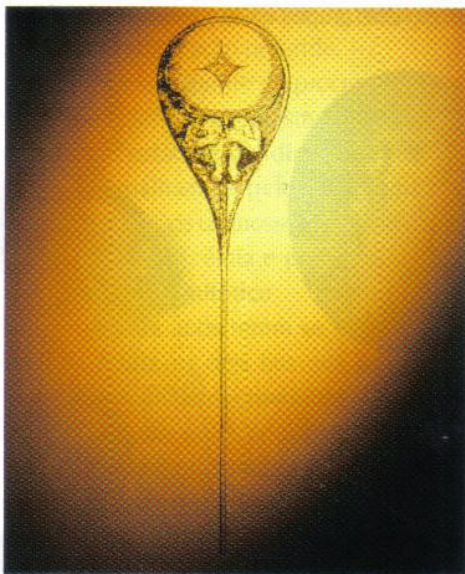
Uma contribuição importante para o conhecimento da herança biológica veio do médico inglês William Harvey (1578-1657). Ele propôs que todo animal se origina de um ovo, idéia que expressou por meio da frase em latim *ex ovo omni*. Harvey acreditava que o ovo produzido pela fêmea necessitava ser fertilizado pelo sêmen do macho para originar um novo ser. Essa idéia foi importante porque se opunha à idéia de geração espontânea, largamente difundida na época.

Harvey apresentou duas possibilidades para o desenvolvimento do ovo após sua fertilização pelo sêmen: a) todo o material para produzir um novo ser já estaria presente no ovo fertilizado, tendo apenas de ser moldado; b) o material que constituiria o novo ser teria de ser produzido à medida que o desenvolvimento fosse ocorrendo, ao mesmo tempo em que moldava o novo organismo.

Outra contribuição importante do século XVII foi a do botânico inglês Nehemia Grew (1641-1711), que sugeriu ser o grão de pólen o elemento masculino na reprodução das plantas com flores. Essa idéia foi apoiada pelo botânico alemão Rudolf Jakob Camerarius (1665-1721), que a apresentou em seu livro *De sexu plantarum epistola*, publicado em 1694.

A teoria da pré-formação

No século XVIII, os defensores das idéias originais de Harvey dedicaram-se a explicar como um ovo fertilizado podia desenvolver um novo ser. Havia, então, duas correntes de explicação. Uma delas, conhecida como **teoria da pré-formação**, ou **pré-formismo**, afirmava que havia um ser pré-formado no ovo; o desenvolvimento consistia apenas no crescimento. Outra corrente admitia que o ovo fertilizado continha um material inicialmente amorfo, mas com potencial para originar um novo ser; este iria estruturando-se e diferenciando-se ao longo do desenvolvimento. Essa idéia ficou conhecida como teoria da epigênese, ou epigenética.

Entre os defensores do pré-formismo havia os "ovistas", para os quais o ser pré-formado estava no óvulo, e os "espermistas", segundo os quais o ser pré-formado estava no esperma. Do primeiro grupo podem-se citar o italiano Marcello Malpighi (1628-1694), o suíço Albrecht von Haller (1708-1777), o francês Charles Bonnet (1720-1793) e o italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799). Entre os espermistas, destacaram-se os holandeses Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723), Nicholas Hartsoeker (1656-1725) e Hermann Boerhaave (1668-1738). **(Fig. 1.2)**

▲ **Figura 1.2** • Ilustração realizada por um espermista, adepto da teoria do homúnculo, segundo a qual havia um minúsculo ser pré-formado na cabeça de cada espermatozóide.

A teoria da epigênese

Apesar de Harvey ter sugerido a possibilidade de ocorrer epigênese, a teoria epigenética foi proposta formalmente pelo anatomista alemão Caspar Friedrich Wolff (1733-1794) em 1759, no trabalho intitulado *Theoria generationis*, e depois em 1764, no trabalho *Theorie von der Generation*. Nessas publicações, Wolff critica as idéias pré-formistas e propõe que a nutrição e o crescimento das plantas dependem de uma força essencial, denominada *vis essentialis*, que tem o poder de formar novos órgãos a partir de material amorfo. Ele acreditava que a fêmea fornecia uma unidade de matéria mais ou menos homogênea, o óvulo, enquanto o macho contribuía com a potencialidade, a *vis essentialis*, para seu desenvolvimento em um novo ser.

A descoberta dos gametas

Um dos pontos fundamentais para o desenvolvimento da Genética foi a constatação de que um novo ser se origina a partir da fusão de duas células, os gametas feminino e masculino. As leis da herança biológica só puderam ser formuladas após a compreensão do papel dos gametas e da fecundação na reprodução dos seres vivos, fato que só veio a ocorrer na segunda metade do século XIX.

A descoberta dos espermatozóides

Em 1667, o microscopista holandês Antonie van Leeuwenhoek descobriu que o sêmen expelido pelos machos contém enorme quantidade de criaturas microscópicas, os espermatozóides, dotados de longas caudas e que se movimentam intensa e continuamente. Ele imaginou que os espermatozóides estavam relacionados com a reprodução, e que no interior de cada um deles havia um ser pré-formado em miniatura.

A idéia de que os espermatozóides participam da reprodução foi inicialmente contestada por vários cientistas, que os consideravam micróbios parasitas do sistema genital masculino. O termo espermatozóide (do grego *spermatos*, semente; *zoon*, animal; e *oide*, que tem forma de) significa, literalmente, animal do esperma. Na décima segunda edição do livro *Systema naturae* (1766-1768), o biólogo sueco Carl Linnaeus (1707-1778) tentou classificar os "animais" encontrados no esperma por Leeuwenhoek, mas concluiu que a determinação de seu lugar correto no sistema de classificação deveria ser deixada para mais tarde, quando eles fossem mais bem conhecidos.

Em 1784, o padre e cientista italiano Lazzaro Spallanzani, um ovista, realizou experimentos com o objetivo de determinar a função do sêmen na reprodução de rãs e concluiu, equivocadamente, que os espermatozóides não participavam da fertilização.

Foi somente em 1841 que o anatomista e fisiologista suíço Rudolf Albert von (Albrecht) Kölliker (1817-1905), ao estudar a estrutura microscópica dos testículos, demonstrou que os espermatozóides não eram parasitas do trato genital masculino, e sim células modificadas. Kölliker observou os diversos estágios de transformação de células dos testículos em espermatozóides. Pouco tempo depois, em 1854, o naturalista inglês George Newport (1803-1854) obteve evidências de que os espermatozóides de rã entram no óvulo durante a fecundação.

A descoberta do óvulo

A produção de ovos por fêmeas de certos animais ovíparos é conhecida há muito tempo; peixes, anfíbios, insetos, répteis e aves apresentam ovos grandes, visíveis a olho nu. A descoberta dos ovos de animais vivíparos como os mamíferos, porém, só ocorreu a partir da segunda metade do século XVII, quando o médico holandês Regnier de Graaf (1641-1673) relacionou os inchaços (folículos) observados nos ovários de fêmeas de mamíferos com a formação de elementos reprodutivos. Em 1828, o naturalista alemão Karl Ernst von Baer (1792-1876) descobriu, no interior de cada folículo ovariano descrito por Graaf, um óvulo. A natureza celular dos óvulos foi estabelecida em 1829 pelo zoólogo alemão Theodor Schwann (1810-1882), mas foi somente em 1861 que o anatomista alemão Karl Gegenbaur (1826-1903) demonstrou definitivamente que o óvulo dos animais vertebrados é uma única célula.

Gametas e fecundação

Após a demonstração definitiva de que espermatozóides e óvulos animais são células, o pré-formismo foi descartado e consolidou-se a idéia de que um novo ser surge sempre a partir da união de **gametas** (do grego *gamos*, união, casamento). Entretanto, durante algum tempo acreditou-se que eram necessários diversos espermatozóides para fecundar um óvulo. Em relação à reprodução das plantas, também admitia-se que um óvulo vegetal era fecundado por vários grãos de pólen, para originar a semente.

Foi somente na segunda metade do século XIX que se consolidou a idéia de que, tanto na reprodução dos animais quanto na das plantas, a formação de um novo ser envolve a fusão de apenas duas células, uma fornecida pelo macho e outra, pela fêmea, processo denominado **fecundação** (do latim *fecundus*, produtivo, fértil), ou **fertilização** (do latim *fertilis*, produtivo, fértil). Mendel, no trabalho em que descreve as leis da hereditariedade, menciona a dúvida ainda existente sobre essa questão, declarando-se partidário da idéia de que apenas dois gametas participam da formação de uma nova planta. Darwin, por sua vez, admitia a participação de vários gametas masculinos para fecundar um óvulo e produzir um novo ser. Os historiadores de ciência acreditam que essa diferença de ponto de vista foi uma das causas do sucesso de Mendel e do insucesso de Darwin em explicar a herança biológica.

A partir dos conhecimentos sobre a fecundação foi possível avançar na compreensão sobre a hereditariedade. Se os gametas são a única ligação física entre as gerações, então eles devem conter toda a informação hereditária para originar um novo organismo. Essa conclusão levou os estudiosos da hereditariedade a concentrar seus estudos nas células gaméticas.

1.3 Descoberta dos cromossomos e das divisões celulares

Um evento marcante na história da ciência foi a elaboração da teoria celular, no decorrer da primeira metade do século XIX. Durante esse período, os cientistas franceses Henri Dutrochet (1776-1847) e François Raspail (1794-1878) e os alemães Mathias Jakob Schleiden (1804-1881), Theodor Schwann (1810-1882) e Rudolph Virchow (1821-1902), entre outros, chegaram à conclusão de que a célula é o constituinte fundamental dos seres vivos e a sede dos processos vitais. Em 1855, Rudolph Virchow resumiu na frase em latim "*omnis cellula ex cellula*" sua convicção de que toda célula sempre se origina de outra célula. **(Fig. 1.3)**

Em 1873, Friedrich Anton Schneider (1831-1890) publicou uma das primeiras descrições das complexas alterações nucleares que ocorrem durante a divisão da célula, hoje chamada de mitose. Schneider descreveu o desaparecimento do núcleo e a transformação de seu conteúdo em filamentos progressivamente mais grossos, que se separam em dois grupos e vão para as células-filhas.

▲ **Figura 1.3** • Principais articuladores da teoria celular, fundamental para o surgimento da Genética. **A.** Henri Dutrochet (1776-1847). **B.** François Raspail (1794-1878). **C.** Mathias Jakob Schleiden (1804-1881). **D.** Theodor Schwann (1810-1882). **E.** Rudolph Virchow (1821-1902).

Em 1882, o anatomista alemão Walther Flemming (1843-1905) descreveu detalhadamente o comportamento dos filamentos nucleares no decorrer da divisão de uma célula. Esses filamentos, devido a sua grande afinidade por corantes, foram chamados de **cromossomos** (do grego *khrôma*, cor, e *sôma*, corpo) pelo biólogo alemão Heinrich Wilhelm Gottfried Waldeyer (1836-1921), em 1888.

Comportamento dos cromossomos na mitose

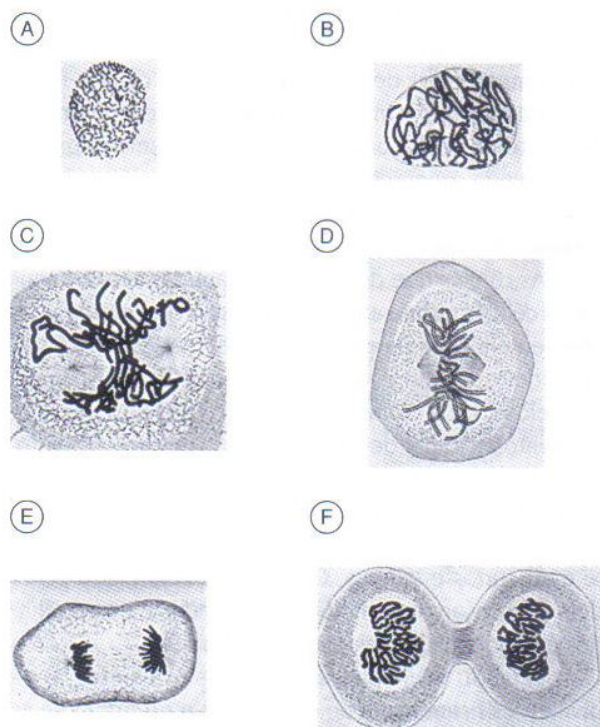
Walther Flemming, estudando células epidérmicas de salamandra, notou alterações no núcleo de uma célula que se divide. Primeiro, os cromossomos tornam-se visíveis como fios finos e longos no interior do núcleo, ficando progressivamente mais curtos e grossos ao longo da divisão celular. Os primeiros citologistas concluíram, acertadamente, que isso se deve ao fato de os fios cromossômicos se enrolarem sobre si mesmos. Flemming notou que, quando os cromossomos se tornam visíveis pela primeira vez, no início da divisão celular, eles estão duplicados, o que se torna evidente à medida que a condensação progride.

Em uma etapa seguinte do processo de divisão, o limite entre o núcleo e o citoplasma, bem evidente nas células que não estão se dividindo, desaparece e os cromossomos espalham-se pelo citoplasma. Uma vez libertados do núcleo, os cromossomos deslocam-se para a região equatorial da célula e prendem-se a um conjunto de fibras, o **fuso mitótico**.

Imediatamente após terem se alinhado na região equatorial da célula, os dois fios que constituem cada cromossomo, denominados **cromátides-irmãs**, separam-se e deslocam-se para pólos opostos da célula, puxados por fibras do fuso mitótico, presas a seus centrômeros. Assim, separam-se dois grupos de cromossomos equivalentes, cada um deles contendo um exemplar de cada cromossomo presente no núcleo original. **(Fig. 1.4)**

Ao chegarem nos pólos da célula, os cromossomos descondensam-se, em um processo praticamente inverso ao que ocorreu no início da divisão. A região ocupada pelos cromossomos em descondensação torna-se distinta do citoplasma, o que levou os primeiros citologistas a concluir, acertadamente, que o envoltório nuclear era reconstituído após a divisão. O emprego do microscópio eletrônico, a partir da segunda metade do século XX, confirmou a existência de uma membrana nuclear, que se desintegra no início do processo de divisão celular e reaparece no final. Enquanto os dois núcleos-filhos se reestruturam nos pólos da célula, o citoplasma divide-se, tendo origem duas novas células. Estas crescem até atingir o tamanho originalmente apresentado pela célula-mãe.

Os primeiros estudiosos da mitose logo verificaram que o número, o tamanho e a forma dos cromossomos variam de espécie para espécie. Os indivíduos de uma espécie, entretanto, geralmente apresentam em suas células conjuntos cromossômicos semelhantes. Por exemplo, uma célula humana tem 46 cromossomos com tamanhos e formas característicos, de modo que se pode identificar uma célula de nossa espécie pelas características de seu conjunto cromossômico. O conjunto de cromossomos, típico de cada espécie, é denominado **cariótipo**.

A constatação de que o número de cromossomos das células se mantém constante ao longo das gerações trouxe uma nova questão: se os gametas juntam seus cromossomos para formar um novo indivíduo, por que o número cromossômico não dobra a cada geração?

▲ **Figura 1.4** • Ilustrações de Flemming (1882) de células de embrião de salamandra fixadas e coradas. **A.** Duas células em intérfase; os cromossomos não são visíveis. **B.** Núcleo em início de mitose (prófase). **C.** Célula logo após o desaparecimento da membrana nuclear (metáfase). **D.** Cromossomos na região equatorial da célula, presos ao fuso; cada cromossomo é constituído de duas cromátides-irmãs. **E.** As cromátides-irmãs separam-se e deslocam-se para os pólos do fuso (anáfase). **F.** Célula em final de divisão com os dois grupos de cromossomos sendo envolvidos pela membrana nuclear (telófase).

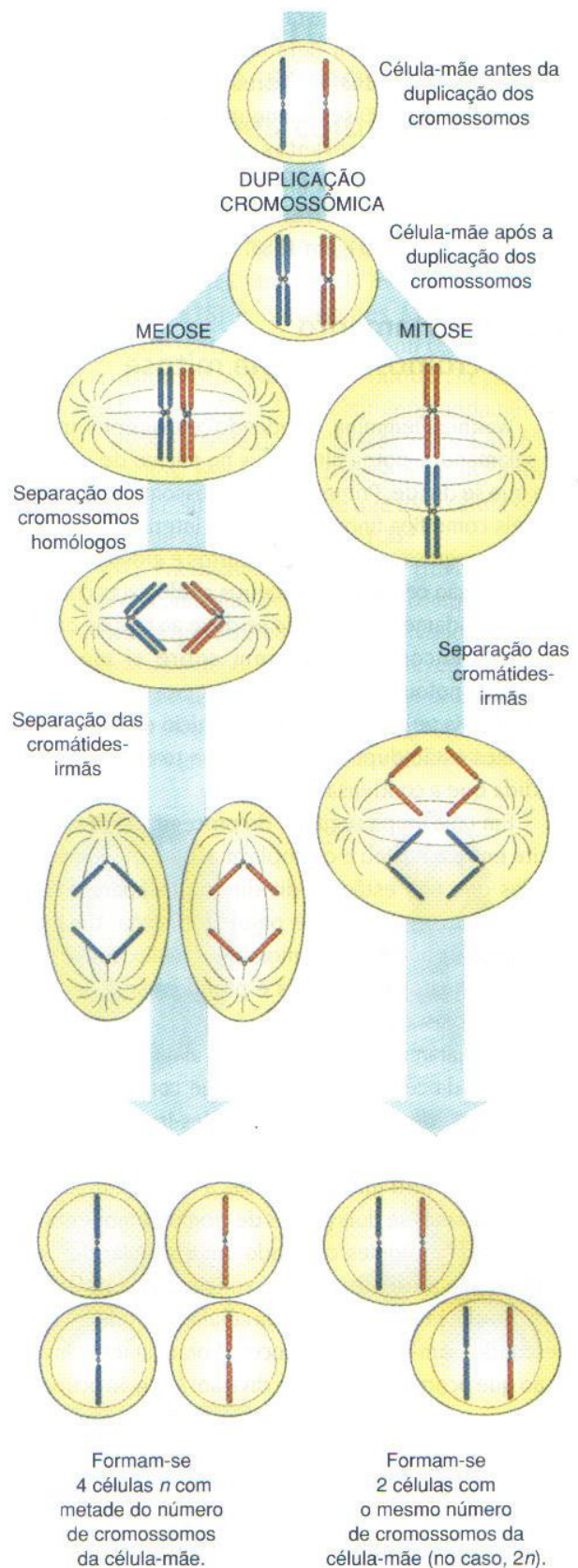
A descoberta da meiose

Em 1885, o biólogo alemão August Friedrich Leopold Weismann (1834-1914) propôs uma hipótese para explicar a constância do número de cromossomos de uma geração para outra. Ele previu, acertadamente, que, na formação dos gametas, devia ocorrer um tipo diferente de divisão celular, em que o número de cromossomos das células-filhas seria reduzido à metade. Esse processo é atualmente conhecido como meiose.

Na época, as observações mais importantes sobre o comportamento dos cromossomos na formação dos gametas estavam sendo realizadas no verme nematóide *Ascaris megalocephala*, atualmente chamado *Parascaris equorum*, a lombriga de cavalo. As células desses vermes apresentam apenas quatro cromossomos de grande tamanho, o que facilita seu estudo.

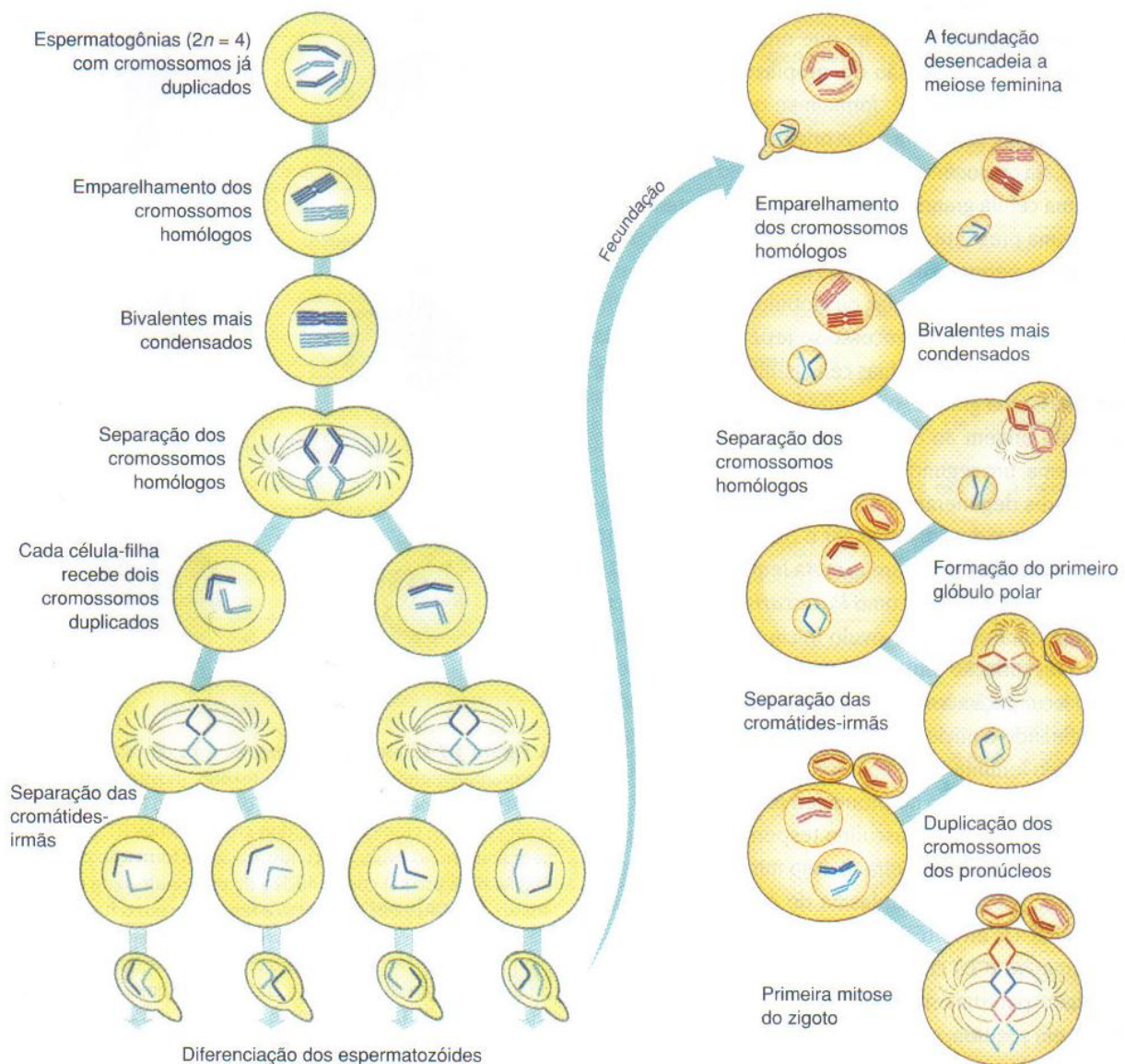
Três citologistas merecem referência especial nos estudos pioneiros sobre os cromossomos na meiose: os biólogos alemães Theodor Heinrich Boveri (1862-1915) e Wilhem August Oskar Hertwig (1849-1922) e o biólogo belga Edouard van Beneden (1846-1912). Eles descobriram que, durante a formação dos gametas, ocorrem duas divisões celulares sucessivas, após uma única duplicação cromossômica, de modo que as quatro células-filhas formadas ficam com metade do número de cromossomos existente na célula original — como Weismann previu que deveria acontecer. Essas duas divisões consecutivas, semelhantes à mitose, compõem o processo de **meiose** (do grego *meíosis*, diminuição).

As células que dão origem a gametas são denominadas **células germinativas**. Em *Parascaris equorum*, elas apresentam dois pares de cromossomos, ou seja, são diplóides e seu número cromossômico é $2n = 4$. No início da meiose, cada cromossomo está constituído por dois filamentos (cromátides-irmãs) unidos pelo centrômero, indicando que antes de a divisão começar ocorreu duplicação cromossômica. Os cromossomos homólogos emparelham-se e condensam-se, tornando-se progressivamente mais curtos e grossos. Cada conjunto formado pelos dois cromossomos homólogos duplicados e emparelhados é denominado **bivalente**, ou **tétrade**.

Quando o envoltório nuclear se desintegra, os bivalentes ficam livres no citoplasma e prendem-se às fibras do fuso que se formou durante a fase inicial do processo de divisão. Cada cromossomo de um bivalente prende-se a fibras de pólos opostos, de modo que um dos cromossomos do par, com suas duas cromátides, fica unido a um dos pólos, o mesmo ocorrendo com o outro em relação ao pólo oposto. Lembre-se que na mitose cada cromossomo prende-se individualmente a fibras de ambos os pólos do fuso, de modo que uma das cromátides fica unida a um dos pólos e a cromátide-irmã, ao pólo oposto. **(Fig. 1.5)**

▲ **Figura 1.5** • Esquema comparativo da separação dos cromossomos na mitose e na meiose de uma célula com um par de cromossomos homólogos.

Uma vez unidos ao fuso, os cromossomos são puxados para os pólos, o que faz os homólogos de cada bivalente se separarem. Um deles, com suas duas cromátides unidas pelo centrômero, migra para um dos pólos da célula e o outro migra para o pólo oposto. Assim, na primeira divisão da meiose, as cromátides-irmãs migram para o mesmo pólo do fuso unidas pela região do centrômero. Relembre que, na mitose, são as cromátides-irmãs que migram para pólos opostos após a separação do centrômero.

Ao atingirem os pólos das células, os cromossomos descondensam-se e originam dois núcleos-filhos, um em cada pólo celular. A célula divide-se em duas, cada uma delas contendo um dos núcleos-filhos. Cada um dos núcleos contém dois cromossomos, constituídos por duas cromátides-irmãs unidas pela região do centrômero. Comparando esses novos núcleos com o núcleo original, podemos ver que o número de cromossomos reduziu-se à metade: na célula que iniciou a meiose havia quatro cromossomos, todos com duas cromátides; após a primeira divisão meiótica, cada núcleo-filho apresenta apenas dois cromossomos, cada um constituído por duas cromátides.

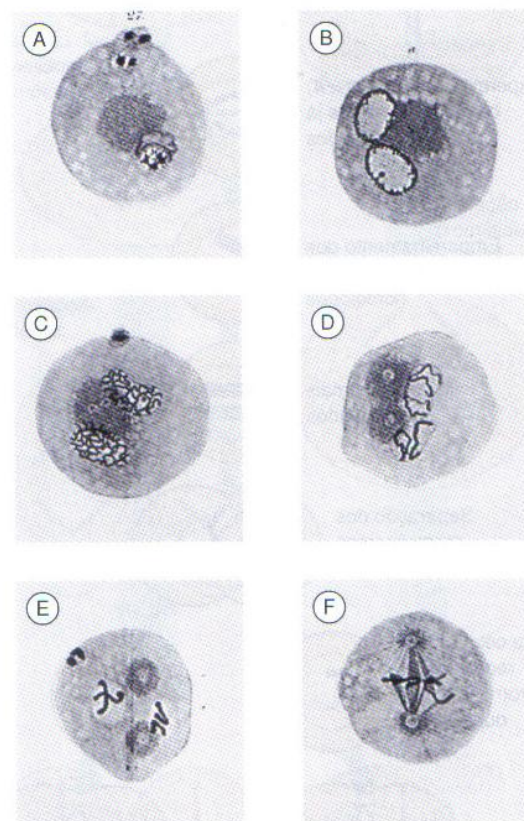
As células formadas na primeira divisão da meiose iniciam a segunda divisão da meiose sem que ocorra nova duplicação cromossômica. A segunda divisão meiótica é idêntica à mitose: os cromossomos condensam-se, o envoltório nuclear desintegra-se e os cromossomos ligam-se às fibras do fuso. Cada cromossomo prende-se a fibras de ambos os pólos, com uma das cromátides unida a um dos pólos e a cromátide-irmã unida ao pólo oposto. **(Fig. 1.6)**

▲ **Figura 1.6** • Representação esquemática da meiose masculina, à esquerda, e da meiose feminina, à direita, em *Parascaris equorum*, a lombriga de cavalo, que apresenta dois pares de cromossomos ($2n = 4$).

As cromátides-irmãs são puxadas para pólos opostos, onde se organizam os núcleos-filhos, dois em cada célula. Assim, a partir da célula com quatro cromossomos ($2n$, ou diplóide) que iniciou o processo, formam-se quatro células com dois cromossomos (n, ou haplóides).

Diversas espécies estudadas nos primeiros anos do século XX mostraram que a meiose é um processo universal e ocorre em todos os organismos com reprodução sexuada. Essa generalização viria a constituir um dos mais importantes fundamentos da Genética. A meiose contrabalança a fecundação e permite a manutenção do número de cromossomos ao longo das gerações.

Apesar de os processos de divisão nuclear serem os mesmos na meiose que origina os espermatozóides — espermatogênese — e na que origina os óvulos — ovulogênese —, a divisão do citoplasma, no primeiro caso, é eqüitativa, isto é, formam-se quatro células de igual tamanho, cada uma delas originando um espermatozóide. Na ovulogênese, a primeira divisão meiótica origina uma célula grande, contendo praticamente todo o citoplasma presente na célula que entrou em meiose, e uma célula pequena, com muito pouco citoplasma, denominada corpúsculo polar, ou glóbulo polar. Na segunda divisão meiótica o processo se repete, com a célula grande dando origem a duas células-filhas de tamanhos desiguais: uma grande, com quase todo o citoplasma e que dará origem ao óvulo, e outra praticamente sem citoplasma, um segundo corpúsculo polar. Os corpúsculos polares degeneram e não têm papel algum no processo da reprodução, a não ser o de reduzir o número de cromossomos do futuro gameta feminino. **(Fig. 1.7)**

Nos nematóides, como *Parascaris equorum*, a célula que dará origem ao óvulo inicia a meiose apenas após a fecundação (entrada do espermatozóide). Ocorrendo fecundação, a meiose feminina de *Parascaris* ocorre originando o núcleo haplóide do óvulo, denominado pronúcleo feminino. Os cromossomos começam, então, a condensar-se tanto no pronúcleo feminino quanto no núcleo do pronúcleo masculino (espermatozóide), preparando-se para a primeira divisão mitótica do ovo fertilizado (zigoto). No citoplasma do óvulo forma-se um fuso único. Os envoltórios de ambos os pronúcleos desintegram-se e os cromossomos de origem materna e de origem paterna espalham-se no citoplasma, prendendo-se, em seguida, ao fuso. Cada cromossomo, materno ou paterno, prende-se a fibras de ambos os pólos, ficando com uma de suas cromátides voltada para um deles e a outra voltada para o pólo oposto. Dois lotes idênticos de cromossomos, então, se separam para constituir os núcleos das células-filhas; cada um deles contém dois cromossomos de origem materna e dois de origem paterna. Reconstitui-se, assim, por meio da fecundação, a condição diplóide típica da espécie, o que leva os biólogos a dizer que a fecundação contrabalança a redução cromossômica ocorrida na meiose.

O Quadro de Consulta apresentado a seguir sintetiza os principais eventos que ocorreram ao longo do século XX e que fizeram da Genética uma das mais desenvolvidas áreas da Biologia; são alguns desses tópicos que estudaremos no decorrer dos capítulos seguintes.

▲ **Figura 1.7** • Desenhos de cortes de ovos de *Parascaris equorum*, realizados por Boveri em 1888, mostrando o início do desenvolvimento. **A.** Formação do segundo corpúsculo polar com dois cromossomos; dois cromossomos permanecem no óvulo; no centro, início de formação do fuso (região mais escura) com o núcleo do espermatozóide mais abaixo. **B.** Pronúcleos masculino e feminino com o fuso em formação entre eles. **C.** Fuso em formação, ladeado pelos pronúcleos com os cromossomos em condensação. **D.** Pólos do fuso evidentes e pronúcleos com cromossomos condensados. **E.** Rompimento do envoltório dos pronúcleos e liberação dos quatro cromossomos no citoplasma. **F.** Cromossomos presos ao fuso, prontos para migrar para os pólos, onde originarão os núcleos das duas primeiras células do novo verme.

QUADRO DE CONSULTA • Marcos da Genética no século XX

Ano	Evento
1900	As **leis fundamentais da hereditariedade**, descobertas por Mendel em 1865, são redescobertas independentemente por C. Correns, H. de Vries e E. von Tschermak.
1901	H. de Vries adota o termo **mutação** para descrever mudanças na qualidade do material hereditário.
1902	C. E. McClung sugere, com base em suas observações, que a **determinação do sexo** em insetos ocorre no momento da fecundação, de acordo com a constituição cromossômica do espermatozóide.
1902-1909	W. Bateson cria os termos **Genética**, **homozigótico**, **heterozigótico**, **alelomorfo** e **epistasia**, além de uma nomenclatura para designar as gerações em experimentos genéticos: **P**, F_1, F_2 etc.
1903	W. Sutton e T. Boveri, independentemente, correlacionam as leis de Mendel com o comportamento dos cromossomos na meiose e sugerem que os fatores hereditários deveriam estar nos cromossomos.
1905	N. M. Stevens descreve os **cromossomos sexuais X e Y** no besouro *Tenebrio molitor*.
1905	L. Cuénot obtém o primeiro indício de fator genético letal (**gene letal**), confirmado em 1910 por W. E. Castle e C. C. Little.
1906	W. Bateson e seus colaboradores E. R. Saunders e R. C. Punnett descrevem o primeiro caso de **ligação genética** (*linkage*), em ervilha-doce, e de interação genética na herança da forma da crista de galináceos.
1906	L. Doncaster e G. H. Raynor descobrem a **herança ligada ao sexo** em mariposas.
1909	F. A. Janssens sugere que as figuras em forma de letra X observadas na meiose, resultantes da sobreposição de cromátides de cromossomos homólogos, seriam originadas pela troca de pedaços entre elas (**permutação ou *crossing-over***).
1909	A. E. Garrod publica o livro *Inborn Errors of Metabolism* (*Erros inatos do metabolismo*), em que aparecem as primeiras discussões sobre **genética bioquímica**.
1909	W. L. Johannsen enfatiza a distinção entre a aparência de um organismo e sua constituição genética e cria o termo **fenótipo** para designar a primeira e **genótipo** para a segunda. Ele cria também o termo **gene** para designar os fatores hereditários.
1909	N. Nilsson Ehle elabora a hipótese de múltiplos fatores (genes aditivos) para explicar a **herança quantitativa** da cor da semente do trigo.
1911	T. H. Morgan descobre os primeiros genes com herança ligada ao sexo na mosca-do-vinagre *Drosophila melanogaster*, e sugere que eles estariam localizados no cromossomo sexual X, iniciando a consolidação da **teoria cromossômica da herança**.
1913	A. H. Sturtevant, ainda um aluno de graduação, trabalhando no laboratório de Morgan, estabelece os princípios de mapeamento de genes nos cromossomos e cria o primeiro **mapa genético**.
1914	C. B. Bridges, também aluno de Morgan, descobre a **não-disjunção cromossômica** e mostra a relação entre esse erro na distribuição dos cromossomos na meiose e alterações no padrão de herança de certos genes, estabelecendo de maneira inequívoca que os genes se encontram nos cromossomos (teoria cromossômica da herança).
1915	J. B. S. Haldane, A. D. Sprunt e N. M. Haldane descrevem o primeiro caso de **ligação genética** (*linkage*) em mamíferos (camundongo).
1916-1917	F. Twort e F. H. D'Herelle descobrem, independentemente, um vírus capaz de atacar e destruir bactérias (**bacteriófago**).
1918	C. B. Bridges descobre a **deficiência cromossômica** em *Drosophila*.
1919	C. B. Bridges descobre a **duplicação cromossômica** em *Drosophila*.
1923	C. B. Bridges descobre a **translocação cromossômica** em *Drosophila*.
1926	A. H. Sturtevant descobre a **inversão cromossômica** em *Drosophila*.
1927	H. J. Muller, um ex-aluno de Morgan, trabalhando com *Drosophila melanogaster*, demonstra que raios X são indutores de **mutação**.

→

Ano	Evento
1928	F. Griffith descobre a transformação bacteriana em pneumococos.
1931	C. Stern, trabalhando com *Drosophila melanogaster*, e H. S. Creighton e B. McClintock, com milho, fornecem as provas citológicas da ocorrência de **permutação** (*crossing-over*) na meiose.
1933	T. H. Morgan recebe o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pelo desenvolvimento da teoria cromossômica da herança com seus trabalhos com a mosca *Drosophila melanogaster*.
1935	G. W. Beadle e B. Ephrussi, com base em seus estudos sobre a cor de olho em *Drosophila*, lançam a hipótese de que os genes atuam controlando as reações químicas celulares por meio de enzimas.
1936	T. Dobzhansky publica o livro *Genetics and the Origin of Species* (*Genética e a origem das espécies*), um marco na área da Genética evolutiva e na construção da **moderna teoria evolucionista**.
1939	E. L. Ellis e M. Delbrück iniciam os estudos com bacteriófagos, marcando o começo dos trabalhos genéticos em vírus.
1941	G. W. Beadle e E. L. Tatum publicam o primeiro trabalho sobre genética bioquímica no fungo *Neurospora crassa*, o qual consolidou a **teoria um gene — uma enzima**.
1943	S. E. Luria e M. Delbrück iniciam os estudos sobre **genética de bactérias**.
1944	O. T. Avery, C. M. MacLeod e M. McCarthy isolam o princípio transformante do pneumococo, mostrando tratar-se do **ácido desoxirribonucléico** (**DNA**), substância descoberta em 1869 por Miescher.
1945	S. E. Luria demonstra a ocorrência de **mutação gênica em bacteriófagos**.
1946	J. Lederberg e E. L. Tatum demonstram a existência de **recombinação gênica em bactérias**.
1946	M. Delbrück, W. T. Bailey e A. D. Hershey demonstram a existência de **recombinação gênica em bacteriófagos**.
1946	H. J. Muller recebe o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela demonstração dos efeitos mutagênicos de raios X em *Drosophila melanogaster*.
1950	J. V. Neel fornece provas de que a **anemia falciforme** (siclemia) é condicionada pela versão recessiva (alelo recessivo) de um gene.
1950	B. McClintock propõe a existência de "genes saltadores" (*transposons*) para explicar certos casos de herança em milho, o que foi confirmado 30 anos mais tarde em diversos organismos.
1952	A. D. Hershey e M. Chase mostram que apenas o DNA do vírus bacteriófago penetra na bactéria durante a infecção e que isso é suficiente para produzir novos vírus completos, sugerindo ser o DNA o material hereditário viral.
1953	J. Watson e F. Crick propõem a estrutura em dupla-hélice para a molécula de DNA.
1956	J. H. Tjio e A. Levan demonstram que os humanos têm 46 cromossomos em suas células (até então, pensava-se que fossem 48).
1957	V. M. Ingram descobre que a diferença entre a hemoglobina normal e a **hemoglobina siclêmica** restringe-se a um único aminoácido na molécula.
1958	M. Meselson e F. W. Stahl demonstram a **duplicação semiconservativa** do DNA.
1958	G. Beadle, E. W. Tatum e J. L. Lederberg recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina. Os dois primeiros pela comprovação de que os genes atuam controlando a síntese das proteínas nas células, e o terceiro por ter desvendado os processos de recombinação genética em bactérias.
1959	J. Lejeune, M. Gautier e R. Turpin descobrem que a síndrome de Down é causada pela presença de um cromossomo a mais nas células (**trissomia do cromossomo 21**).
1959	A. Kornberg e S. Ochoa recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por suas descobertas acerca da **síntese de ácidos nucléicos** (DNA e RNA) nas células.
1961	F. Crick, L. Barnett, S. Brenner e R. J. Watts-Tobin obtêm fortes indícios de que a linguagem genética baseia-se em seqüências de três bases nitrogenadas na molécula de DNA.
1961	F. Jacob e J. Monod propõem o modelo de regulação gênica em bactéria e a existência do RNA mensageiro, identificado logo depois.
1961	M. W. Nirenberg, H. Matthaei, S. Ochoa e H. G. Khorana desvendam o código genético, estabelecendo a relação entre os 20 aminoácidos que formam as proteínas e 61 trincas de bases nitrogenadas do RNA mensageiro.

→

Ano	Evento
1962	J. D. Watson, F. H. C. Crick e M. Wilkins recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus estudos sobre a estrutura da molécula de DNA.
1965	F. Jacob, J. Monod e A. Lwoff recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus trabalhos sobre regulação da atividade gênica em bactéria e em vírus bacteriófagos.
1968	R. W. Holley, H. G. Khorana e M. W. Nirenberg recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela decifração do código genético e seu papel na síntese das proteínas.
1969	M. Delbrück, A. D. Hershey e S. Luria recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por suas descobertas sobre a estrutura genética e os mecanismos de replicação dos bacteriófagos.
1974	C. A. Hutchinson, J. E. Newbold, S. S. Potter e M. A. Edgell demonstram a herança exclusivamente materna do DNA mitocondrial em híbridos entre cavalo e jumento.
1975	D. Baltimore, R. Dulbecco e H. M. Temin recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus trabalhos sobre a interação de vírus causadores de tumores e o material genético das células.
1978	W. Arber, D. Nathans e H. O. Smith recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela descoberta das enzimas de restrição e sua aplicação em problemas de Genética molecular.
1980	P. Berg, W. Gilbert e F. Sanger recebem o Prêmio Nobel em Química. O primeiro por seus estudos sobre a bioquímica dos ácidos nucléicos, que levaram ao desenvolvimento da tecnologia do DNA recombinante (Engenharia Genética); os dois últimos por sua contribuição no desenvolvimento de métodos de seqüenciamento do DNA.
1983	B. McClintock recebe o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela descoberta, em 1950, dos elementos genéticos móveis (*transposons*).
1987	S. Tonegawa recebe o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus estudos sobre a genética da diversidade dos anticorpos.
1989	J. M. Bishop e H. Varmus recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus estudos sobre genes causadores de tumor (oncogenes).
1989	S. Altman e T. R. Cech recebem o Prêmio Nobel em Química pela descoberta das ribozimas, moléculas de RNA com atividade catalítica.
1993	R. J. Roberts e P. A. Sharp recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela descoberta dos genes interrompidos (*split genes*) dos organismos eucarióticos.
1993	K. B. Mullis e M. Smith recebem o Prêmio Nobel em Química. O primeiro pela invenção do método PCR (reação da polimerase em cadeia) para multiplicação de segmentos específicos de DNA *in vitro*; o segundo pelo desenvolvimento da técnica de mutações dirigidas em sítios específicos e seu emprego no estudo de proteínas.
1995	E. B. Lewis, C. Nüsslein-Volhard e E. F. Wieschaus recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela identificação dos genes que controlam o início do desenvolvimento dos animais (genes homeóticos).
1995	Fleischmann e colaboradores publicam a primeira seqüência completa de bases nitrogenadas de um organismo de vida livre, a bactéria *Haemophilus influenzae*.
1996	Mais de 600 cientistas, trabalhando em cooperação, completam o seqüenciamento das bases nitrogenadas dos cromossomos de *Saccharomyces cerevisiae*, o primeiro genoma eucariótico completamente seqüenciado.
1997	S. B. Prusiner recebe o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pela descoberta dos príons.
2000	É anunciada a conclusão do seqüenciamento dos cerca de 3 bilhões de pares de bases que constituem o genoma humano.
2002	S. Brenner, H. R. Horvitz e J. E. Sulston recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por suas descobertas, no verme nematóide *Caenorhabditis elegans*, sobre a regulação genética do desenvolvimento dos órgãos e o processo de morte celular programada.
2004	L. B. Buck e R. Axel recebem o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina pelo estudo de genes envolvidos na identificação de odores.

LEITURA

A IMPORTÂNCIA DA TEORIA GENÉTICA

A replicação e todos os demais aspectos da vida são reflexos da estrutura e do funcionamento do material genético — o ácido nucléico

As conseqüências estruturais e funcionais da atividade do material genético em todos os níveis de organização, desde a célula até o organismo, são estudadas pela Morfologia e pela Fisiologia

Em 1973, o famoso biólogo Theodosius Dobzhansky lançou um desafio aos criacionistas, "Nada em Biologia faz sentido a não ser sob a luz da evolução". Isso é uma verdade, embora exista algo mais fundamental de onde derivam todos os principais conceitos em Biologia, a Genética.

A característica fundamental de um ser vivo é sua capacidade de se replicar com grande exatidão, transformando matéria e energia do mundo não-vivo em mais matéria viva. A replicação e todos os demais aspectos da vida são reflexos da estrutura e do funcionamento do material genético — o ácido nucléico. A Genética é o campo de investigação que procura entender esse fenômeno de replicação e, portanto, deve ser considerada básica para toda a Biologia. Veja como a replicação genética está na base de todas as áreas da Biologia.

A Genética, incluindo sua manifestação a longo prazo — a Biologia Evolutiva —, é a disciplina integradora de todos os conceitos e informações biológicas

A Biologia Evolutiva é o campo que investiga os aspectos da replicação ao longo do tempo. A Biologia do Desenvolvimento é o campo de investigação que lida com a replicação ao longo do ciclo de vida de um organismo. A Sistemática estuda a diversidade da vida que é uma conseqüência da replicação, modulada pelo ambiente ao longo do tempo. A Ecologia lida com as interações entre o ambiente e o indivíduo ou grupos de indivíduos, os quais são geneticamente programados. As conseqüências estruturais e funcionais da atividade do material genético em todos os níveis de organização, desde a célula até o organismo, são estudadas pela Morfologia e pela Fisiologia.

Assim, a Genética, incluindo sua manifestação a longo prazo — a Biologia Evolutiva —, é a disciplina integradora de todos os conceitos e informações biológicas.

- **Fonte:** John A. Moore. Science as a Way of Knowing — Genetics. *American Zoologist* v. 26: p. 583-747, 1986. (*Tradução e adaptação nossa*)

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

1.1 Primeiras idéias sobre herança biológica

1. O que é a Genética?

2. Explique em que consiste a hipótese da pangênese.

1.2 As bases da hereditariedade

3. Em que consiste a teoria da pré-formação, ou pré-formismo?

4. O que diz a teoria da epigênese?

5. Quando e como se chegou à conclusão de que espermatozóides são células implicadas na fecundação?

6. Descreva brevemente a história da descoberta do gameta feminino.

1.3 Descoberta dos cromossomos e das divisões celulares

7. Conceitue cromossomo, cromátide, centrômero, fuso e mitose.

8. Descreva sucintamente o conjunto de alterações que ocorrem durante a divisão de uma célula, denominada mitose por Flemming.

9. Qual foi a hipótese proposta por Weismann para explicar a manutenção da constância do número de cromossomos entre as gerações?

10. Que resultados permitiram a aceitação da hipótese de Weismann?

11. Qual é a diferença fundamental entre a primeira divisão da meiose e uma mitose?

12. Compare, por meio de esquemas simplificados, a separação dos cromossomos na meiose e na mitose, para uma célula com um par de cromossomos homólogos ($2n = 2$).

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

13. Dos cinco eventos listados a seguir, quatro ocorrem tanto na mitose quanto na meiose. Indique qual deles acontece somente na meiose.
   a) Condensação dos cromossomos.
   b) Formação do fuso.
   c) Emparelhamento dos cromossomos homólogos.
   d) Migração dos cromossomos.
   e) Descondensação dos cromossomos.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 14 a 16.
   a) August Weismann.
   b) Theodor Schwann.
   c) Rudolph Virchow.
   d) Walther Flemming.

14. Quem lançou a hipótese de que na formação dos gametas deveria ocorrer um tipo de divisão celular diferente da mitose?

15. Quem foi o autor da célebre frase em latim *"omnis cellula ex cellula"*, para expressar a idéia de que as células se originam por multiplicação de células preexistentes?

16. Quem é considerado o descobridor da mitose pelo fato de ter descrito em detalhe os eventos cromossômicos que ocorrem durante o processo de divisão celular?

17. A teoria celular mostrou que, apesar das diferenças visíveis a olho nu, todos os seres vivos são iguais em sua constituição básica, pois
   a) são capazes de se reproduzir sexuadamente.
   b) são formados por células.
   c) contêm moléculas.
   d) se originam de gametas.

QUESTÕES DISCURSIVAS

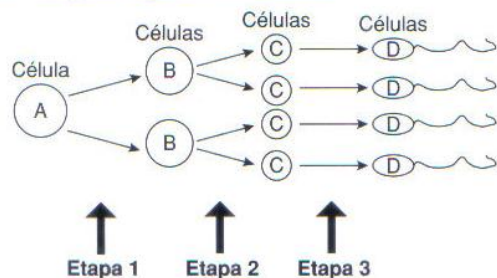
18. Que argumento justifica a idéia de que a informação hereditária está contida nos gametas?

19. Qual é o significado da meiose e da fertilização no ciclo de vida dos organismos?

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

20. (UERJ) Até o século XVII, o papel dos espermatozóides na fertilização do óvulo não era reconhecido. O cientista italiano Lazzaro Spallanzani, em 1785, questionou se seria o próprio sêmen, ou simplesmente o vapor dele derivado, a causa do desenvolvimento do óvulo. Do relatório que escreveu a partir de seus estudos sobre a fertilização, foi retirado o seguinte trecho:
   "... para decidir a questão, é importante empregar um meio conveniente que permita separar o vapor da parte figurada do sêmen e fazê-lo de tal modo, que os embriões sejam mais ou menos envolvidos pelo vapor."
   Dentre as etapas que constituem o método científico, esse trecho do relatório é um exemplo de:
   a) análise de dados;
   b) coleta de material;
   c) elaboração da hipótese;
   d) planejamento do experimento.

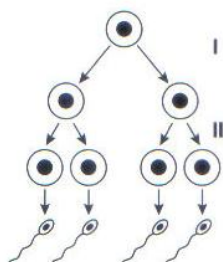
21. (UEL) O esquema a seguir representa etapas do processo de gametogênese no homem:

Sobre esse processo, assinale a alternativa correta

a) A célula A é diplóide e as células B, C e D são haplóides.
b) A separação dos homólogos ocorre durante a etapa 2.
c) As células A e B são diplóides e as células C e D são haplóides.
d) A redução no número de cromossomos ocorre durante a etapa 3.
e) A separação das cromátides-irmãs ocorre durante a etapa 1.

22. (UFRS) Assinale a alternativa que completa corretamente a afirmação abaixo:

Durante a gametogênese, quando ocorre a primeira divisão meiótica (anáfase I),

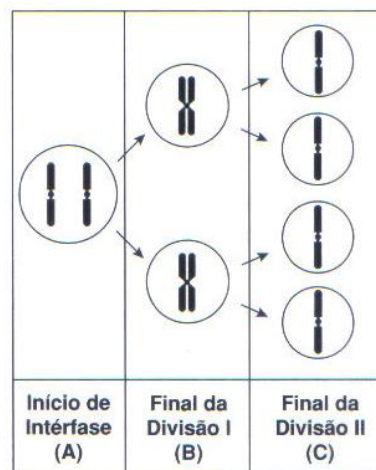
a) as cromátides separam-se, dirigindo-se para pólos opostos do fuso, resultando em uma divisão equacional que origina duas novas células, no caso da espermatogênese.
b) as cromátides separam-se, sendo desigual a divisão do citoplasma, no caso da ovogênese, o que dá origem a um ovócito e dois corpúsculos polares.
c) os cromossomos homológos separam-se, dirigindo-se para pólos opostos do fuso, resultando em uma divisão reducional que origina, no caso da espermatogênese, duas novas células.
d) formam-se quatro novas células, cada uma com um cromossomo de cada par de homólogos, no caso da ovogênese.
e) formam-se quatro novas células, cromossomicamente idênticas, que, no caso da espermatogênese, sofrerão transformações estruturais originando quatro espermatozóides.

23. (PUCCAMP) O esquema a seguir representa fases da gametogênese.

I e II correspondem, respectivamente, a

a) duas mitoses sucessivas.
b) duas meioses sucessivas.
c) uma mitose e uma meiose.
d) meiose I e meiose II.
e) uma meiose e uma mitose.

24. (FUVEST) Qual dos seguintes eventos ocorre no ciclo de vida de toda espécie com reprodução sexuada?

a) Diferenciação celular durante o desenvolvimento embrionário.
b) Formação de células reprodutivas dotadas de flagelos.
c) Formação de testículos e de ovários.
d) Fusão de núcleos celulares haplóides.
e) Cópula entre macho e fêmea.

25. (FUVEST) A figura mostra etapas da segregação de um par de cromossomos homólogos em uma meiose em que não ocorreu permuta:

No início da intérfase, antes da duplicação cromossômica que precede a meiose, um dos representantes de um par de alelos mutou por perda de uma seqüência de pares de nucleotídeos.

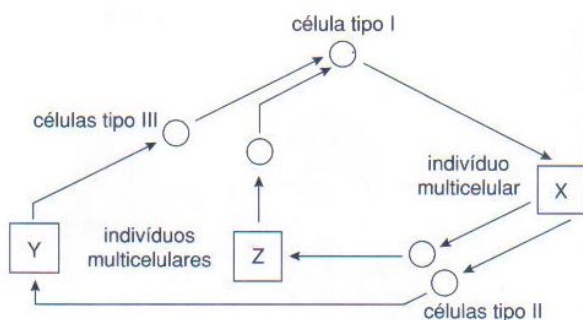
Considerando as células que se formam no final da primeira divisão (B) e no final da segunda divisão (C), encontraremos o alelo mutante em

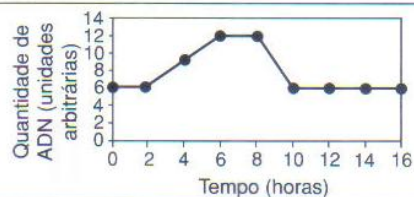
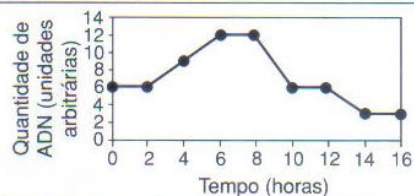
a) uma célula em B e nas quatro em C.
b) uma célula em B e em duas em C.
c) uma célula em B e em uma em C.
d) duas células em B e em duas em C.
e) duas células em B e nas quatro em C.

QUESTÕES DISCURSIVAS

26. (UNICAMP) Nos animais, a meiose é o processo básico para a formação dos gametas. Nos mamíferos há diferenças entre a gametogênese masculina e a feminina.

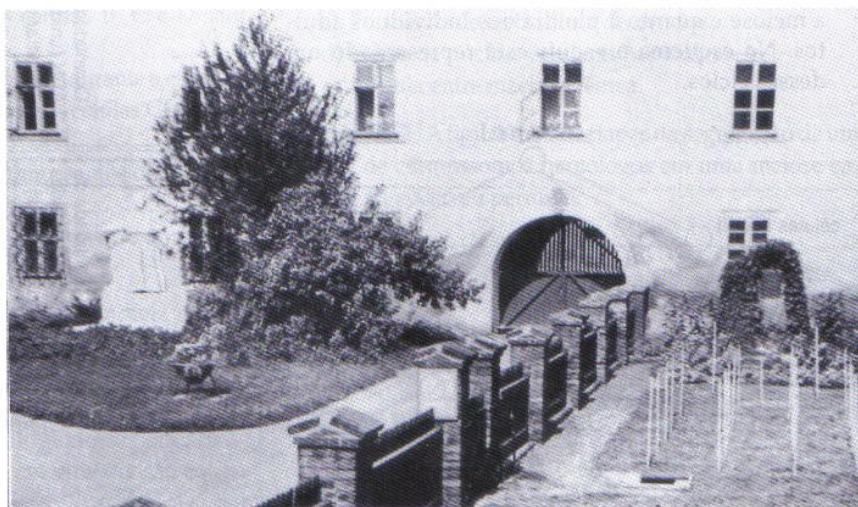
a) Nos machos, a partir de um espermatócito primário obtêm-se 4 espermatozóides. Que produtos finais são obtidos de um oócito primário? Em que número?
b) Se um espermatócito primário apresenta 20 cromossomos, quantos cromossomos serão encontrados em cada espermatozóide? Explique.
c) Além do tamanho, os gametas masculinos e femininos apresentam outras diferenças entre si. Cite uma delas.

27. (FUVEST) As algas apresentam os três tipos básicos de ciclo de vida que ocorrem na natureza. Esses ciclos diferem quanto ao momento em que ocorre a meiose e quanto à ploidia dos indivíduos adultos. No esquema a seguir está representado um desses ciclos.

a) Identifique as células tipo I, II e III.
b) Considerando que o número haplóide de cromossomos dessa alga é 12 (n = 12), quantos cromossomos os indivíduos X, Y e Z possuem em cada uma de suas células?

28. (UFRJ) Um pesquisador determinou as variações nas concentrações de ADN ao longo do tempo, em células do ovário e do epitélio intestinal de um animal. As variações na quantidade de ADN em cada célula nos dois casos estão registradas nas figuras 1 e 2.

Qual das figuras (1 ou 2) corresponde às células do ovário e qual corresponde ao epitélio intestinal. Justifique.

CAPÍTULO

2 LEI DA SEGREGAÇÃO GENÉTICA

▶ Jardins do mosteiro de Saint Thomas, em Brünn, atual República Tcheca, onde Mendel realizou seus experimentos de Genética.

2.1 A descoberta da lei da segregação

Pode-se dizer que a Genética começou a existir formalmente a partir de 1900, com os estudos de três biólogos, o holandês Hugo de Vries (1848-1935), o alemão Carl Erich Correns (1864-1933) e o austríaco Erich von Tschermark-Seysenegg (1871-1962). Embora eles não trabalhassem juntos, chegaram às mesmas explicações para a hereditariedade; entretanto, ao pesquisar os trabalhos de seus antecessores, esses cientistas descobriram que suas idéias não eram originais; 35 anos antes, o monge agostiniano Gregor Johann Mendel (1822-1884) havia chegado às mesmas conclusões que eles sobre as leis fundamentais que regem a herança biológica. **(Fig. 2.1)**

▲ **Figura 2.1** • Gregor Johann Mendel (1822-1884) (**A**) propôs, em 1865, as leis básicas da herança, redescobertas em 1900 por Hugo de Vries (1848-1935) (**B**), Carl Erich Correns (1864-1933) (**C**) e Erich von Tschermark-Seysenegg (1871-1962) (**D**).

QUADRO 2.1 • Quem foi Gregor Mendel?

Gregor Johann Mendel nasceu em 1822, no vilarejo de Heinzendorf, no nordeste da Morávia; essa região, na época, pertencia à Áustria e, atualmente, faz parte da República Tcheca. Mendel, querendo continuar a estudar, porém impossibilitado de fazê-lo porque seus pais eram agricultores pobres, resolveu entrar como noviço no mosteiro agostiniano de São Tomás, na cidade de Brünn. Quatro anos mais tarde, em 1847, ele ordenou-se padre.

Durante seu noviciado, Mendel aprendeu ciências agrárias e técnicas de polinização artificial, que permitiam realizar cruzamentos entre variedades de plantas. Terminada a formação básica, Mendel assumiu o posto de professor substituto em uma escola da região, passando a lecionar Latim, Grego e Matemática. Com o objetivo de obter um diploma definitivo de professor, ele submeteu-se a exames de competência em Viena, mas foi reprovado. Os examinadores, no entanto, o recomendaram à universidade vienense, pois o viam como alguém que poderia aprofundar-se nos estudos. Com a permissão de seus superiores do mosteiro, Mendel estudou em Viena entre 1851 e 1853. O curso formalmente escolhido foi Física, mas Mendel assistiu a cursos adicionais de Matemática, Química, Zoologia, Botânica, Fisiologia vegetal e Paleontologia.

Em Viena, Mendel teve professores renomados, que o influenciaram positivamente em relação às questões científicas. Com o físico e matemático Andrea Ritter von Ettingshausen (1796-1878), ele entrou em contato com métodos quantitativos e experimentais em ciência, utilizados mais tarde em seu trabalho com ervilhas. Outro professor que exerceu grande influência sobre Mendel foi o botânico Franz Unger (1800-1870), especialista em anatomia e fisiologia das plantas. Unger era um pesquisador ativo e descobriu, entre outras coisas, os anterozóides dos musgos.

Durante sua estada em Viena, Mendel dedicou-se a estudar a hibridização em plantas, adquirindo diversos livros e artigos sobre o assunto, entre os quais alguns sobre hibridização em ervilhas. Retornou ao mosteiro de Brno em 1853 e, em 1856, voltou a Viena para submeter-se aos exames para o magistério, tendo sido novamente reprovado. Ao que tudo indica, o motivo da reprovação deveu-se à divergência entre as idéias de Mendel e as de um examinador quanto à reprodução sexuada em plantas (segundo os historiadores, Mendel é quem tinha razão). Nessa época, ele já havia começado a realizar experimentos com ervilhas, e o desapontamento com a carreira acadêmica foi contrabalançado por seu entusiasmo com a pesquisa recém-iniciada.

Durante seus estudos em Viena, Mendel conheceu as grandes questões a serem respondidas pela Biologia, entre as quais se destacava a hereditariedade. Tendo aprendido as técnicas de hibridização em plantas e estudado diversos trabalhos nessa área, ele concluiu que uma das maneiras de investigar o problema da hereditariedade seria por meio de cruzamentos entre variedades que diferissem quanto a características hereditárias.

A biografia de Gregor Mendel indica que ele não era leigo em ciência. Se fosse, não teria conseguido fazer descobertas tão importantes no campo da hereditariedade. Suas idéias eram tão avançadas que não foram compreendidas na época, só vindo a ser redescobertas 35 anos mais tarde, por Correns, De Vries e Tschermark. ■

Os trabalhos de Mendel

A maioria dos biólogos da segunda metade do século XIX acreditava que a hereditariedade baseava-se na transmissão de entidades materiais dos pais para os filhos. Eles admitiam, também, que essa transmissão só poderia ocorrer através dos gametas, pois estes são a única ligação física entre as gerações. Mendel descobriu que as características hereditárias são herdadas segundo regras bem definidas e propôs uma explicação para a existência dessas regras.

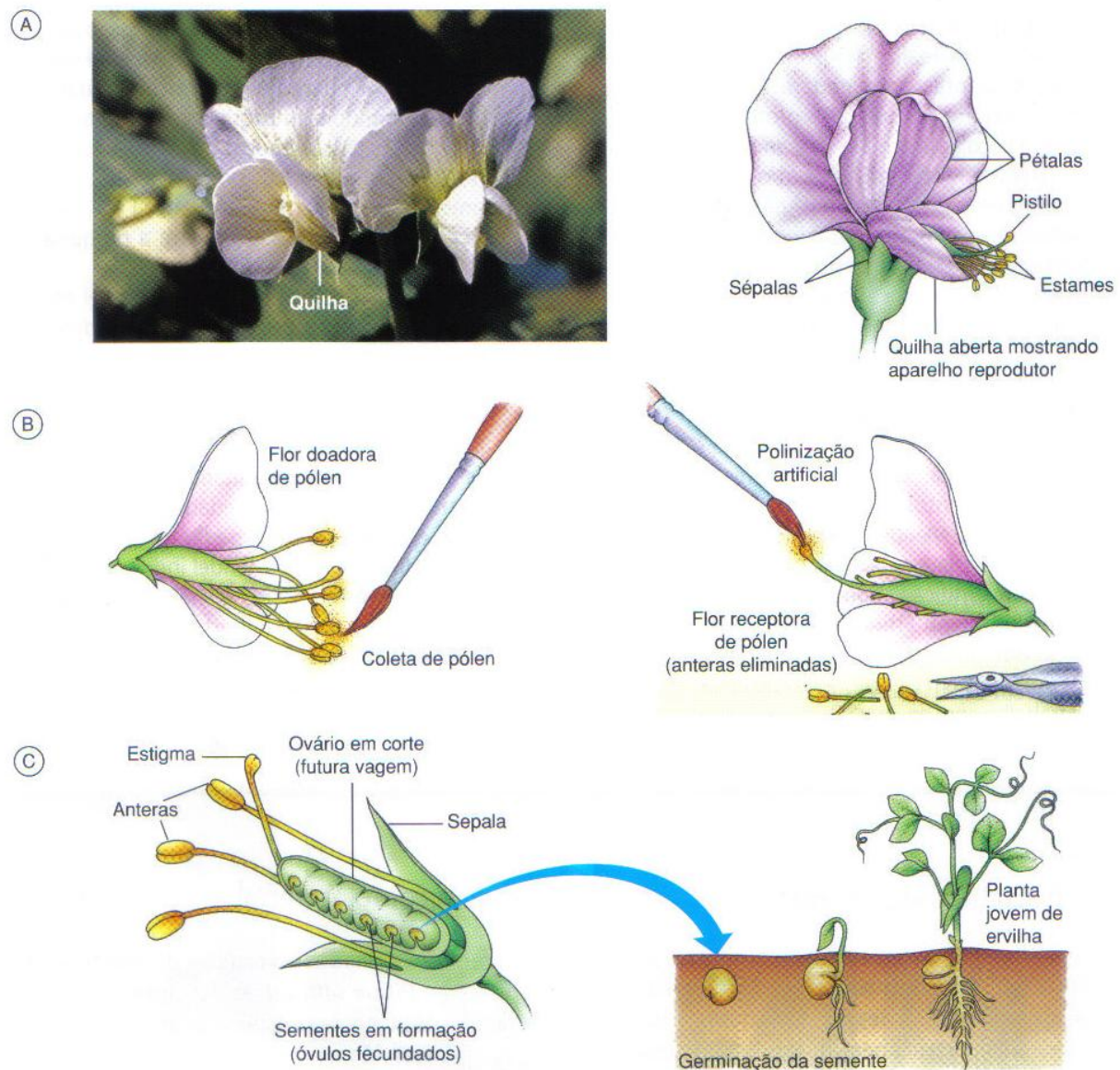
A ervilha como material experimental

Mendel escolheu como material de estudo a ervilha-de-cheiro *Pisum sativum*. As principais razões que o levaram a optar por essa espécie foram:

1. a facilidade de cultivo;
2. a existência de variedades facilmente identificáveis por características marcadamente distintas;
3. o ciclo de vida curto, que permite obter várias gerações em pouco tempo;

4. a obtenção de descendência fértil no cruzamento de variedades diferentes;
5. a facilidade com que se pode realizar polinização artificial.

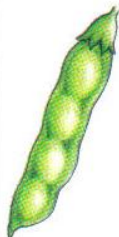
As ervilhas são plantas da família das leguminosas, que apresentam fruto em forma de vagem, chamado de legume pelos botânicos. A flor da ervilha é hermafrodita, isto é, possui órgãos reprodutores masculinos e femininos; estes ficam encerrados em uma espécie de urna — a quilha —, formada por duas pétalas modificadas e sobrepostas. A quilha impede a polinização por pólen de outras flores; conseqüentemente, os óvulos de uma flor são quase sempre fecundados por seus próprios grãos de pólen, processo denominado **autofecundação**.

Para realizar **fecundação cruzada** entre duas plantas de ervilha, é preciso abrir previamente a quilha de algumas flores e cortar suas anteras, o que corresponde a "castrar" a parte masculina. Quando a parte feminina está madura, abre-se novamente a quilha e coloca-se, sobre o estigma, pólen retirado de flores intactas de outra planta. Assim, podem-se cruzar variedades distintas e obter sementes **híbridas** (do grego *hybris*, misturado por cruzamento). **(Fig. 2.2)**

▲ **Figura 2.2** • **A.** Foto e esquema de flor de ervilha, mostrando suas principais partes. **B.** Esquema da polinização artificial em ervilha. **C.** Esquema de uma flor de ervilha fecundada, mostrando a formação do fruto (a vagem) que contém as sementes (os "grãos-de-ervilha"). Ao germinar, a semente origina uma nova planta.

Mendel iniciou seus trabalhos com 34 variedades diferentes de ervilha, entre as quais selecionou as que mais convinham a seus experimentos. A idéia era trabalhar com variedades cujas características não sofressem alteração de uma geração para outra, o que seria uma garantia de se estar trabalhando com características hereditárias, e não com variações decorrentes de fatores ambientais. Mendel escolheu, também, características com formas bem contrastantes, para que não houvesse dúvida quanto à sua identificação. Por exemplo, quanto à característica "cor dos cotilédones da semente", há apenas duas cores, amarela e verde, sem cores intermediárias. Depois de um criterioso trabalho de seleção, Mendel concentrou-se no estudo de sete características, cada uma delas com duas formas, ou traços, bem contrastantes. **(Fig. 2.3)**

Um dos grandes méritos de Mendel foi ter considerado apenas uma característica de cada vez. Ao cruzar plantas de semente amarela com plantas de semente verde, por exemplo, ele simplesmente desconsiderava características como altura, forma das sementes, posição das flores no caule etc., atendo-se exclusivamente à característica escolhida.

Gerações P, F_1 e F_2

Antes de iniciar cada cruzamento, Mendel certificava-se de estar lidando com plantas de **linhagens puras**. Para ele, eram puras as linhagens que, por autofecundação, davam origem somente a plantas iguais a si. Uma linhagem pura alta, por exemplo, quando autofecundada ou cruzada com outra idêntica a si, só produz descendentes altos.

Mendel realizou cruzamentos entre plantas puras que diferiam quanto a cada uma das sete características que ele escolheu. Por exemplo, plantas puras de semente amarela eram cruzadas com plantas puras de semente verde; plantas puras altas eram cruzadas com plantas puras anãs; plantas puras de flores terminais eram cruzadas com plantas puras de flores axiais; e assim por diante.

Nesses cruzamentos, a geração constituída pelas variedades puras era denominada **geração parental**, hoje chamada, abreviadamente, **geração P**. A descendência imediata desses cruzamentos era chamada de **primeira geração híbrida**, hoje denominada **geração F_1** (primeira geração de filhos). A descendência resultante da autofecundação da primeira geração híbrida (F_1) era denominada segunda geração híbrida, hoje chamada de **geração F_2**.

Traços dominantes e traços recessivos

Mendel observou que os indivíduos híbridos da geração F_1 eram sempre iguais a um dos pais. Por exemplo, os híbridos originados do cruzamento de plantas puras altas com plantas puras anãs eram sempre altos e indistinguíveis da planta alta pura. O traço "baixa estatura" aparentemente desaparecia na geração F_1. A autofecundação das plantas híbridas, no entanto, produzia uma descendência constituída por plantas altas e por plantas anãs. Isso levou Mendel a concluir que, nas plan-

Forma da semente	Cor da semente	Cor da casca da semente	Forma da vagem	Cor da vagem	Posição das flores	Altura da planta
Lisa	Amarela	Cinza	Inflada	Verde	Axilar	Alta
Rugosa	Verde	Branca	Comprimida	Amarela	Terminal	Anã

▲ **Figura 2.3** • Em seus estudos com ervilhas, Mendel escolheu sete diferentes características. Cada uma apresenta duas formas alternativas, ou traços, facilmente identificáveis.

tas da geração F_1, o traço de um dos pais ficava "em recesso", isto é, encoberto, reaparecendo novamente na geração F_2. O traço que desaparecia nas plantas híbridas foi chamado de **recessivo**, enquanto o traço que se manifestava foi chamado de **dominante**. No caso da estatura das plantas, o traço alto é dominante, e o traço baixo, recessivo. **(Tab. 2.1)**

TABELA 2.1 • Traços dominantes e recessivos das sete características estudadas por Mendel

Característica	Traço dominante	Traço recessivo
Forma da semente	Lisa	Rugosa
Cor da semente (cotilédones)	Amarela	Verde
Cor da casca da semente	Cinza	Branca
Forma da vagem	Inflada	Comprimida
Cor da vagem	Verde	Amarela
Posição das flores	Axilar	Terminal
Altura da planta	Alta	Baixa

A proporção 3 : 1 na geração F_2

Alguns predecessores de Mendel já haviam observado que certos traços desapareciam em uma geração, reaparecendo na geração seguinte. A originalidade de Mendel consistiu em estabelecer a relação entre as quantidades de plantas que exibiam o traço dominante e as que exibiam o traço recessivo, ou seja, a proporção (ou razão) entre os dois tipos de planta da geração F_2. Essa visão matemática, quantitativa, aplicada aos cruzamentos, foi uma das grandes novidades que Mendel introduziu nos estudos genéticos.

No cruzamento entre plantas puras de sementes amarelas e plantas puras de sementes verdes, por exemplo, Mendel obteve, em F_2, de um total de 8.023 sementes, 6.022 sementes amarelas e 2.001 sementes verdes. Dividindo-se o número de sementes amarelas pelo número de sementes verdes, obtém-se a proporção de aproximadamente 3,01 : 1.

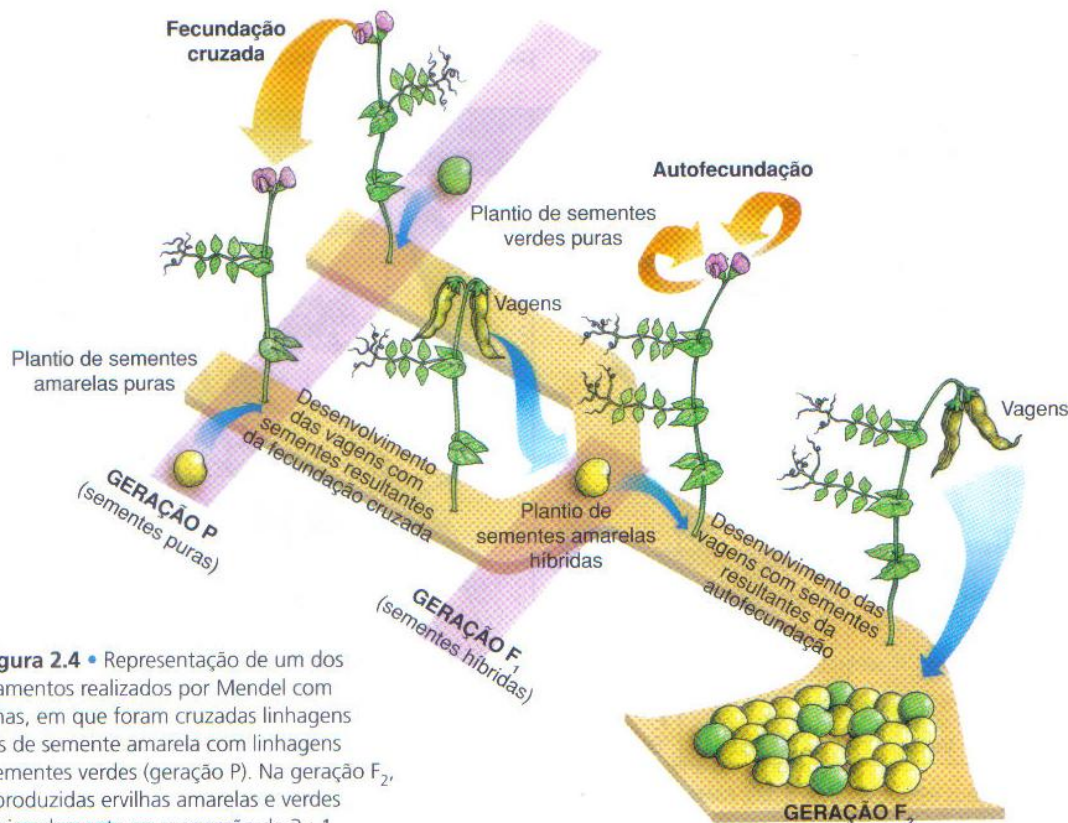
Em outros experimentos, em que plantas puras de sementes lisas foram cruzadas com plantas puras de sementes rugosas, obtiveram-se, em F_2, 5.474 sementes lisas e 1.850 sementes rugosas, o que representa a proporção de aproximadamente 2,96 : 1. Apesar de haver pequenas variações, os números obtidos nos diferentes experimentos eram sempre próximos de 3 : 1 $\left(\text{ou } \frac{3}{4} : \frac{1}{4}\right)$. **(Fig. 2.4) (Tab. 2.2)**

▲ **Figura 2.4** • Representação de um dos cruzamentos realizados por Mendel com ervilhas, em que foram cruzadas linhagens puras de semente amarela com linhagens de sementes verdes (geração P). Na geração F_2, são produzidas ervilhas amarelas e verdes aproximadamente na proporção de 3 : 1.

TABELA 2.2 • Resultados obtidos por Mendel em duas gerações de ervilhas

Tipos de cruzamento entre plantas "puras"	Características das plantas F_1	Autofecundação de F_1	Plantas F_2	Razão entre os tipos F_2
1. Forma das sementes Lisa × Rugosa	Sementes lisas	Lisa × Lisa	5.474 lisas 1.850 rugosas 7.324 (total)	2,96 : 1
2. Cor das sementes Amarela × Verde	Sementes amarelas	Amarela × Amarela	6.022 amarelas 2.001 verdes 8.023 (total)	3,01 : 1
3. Cor da casca das sementes Cinza × Branca	Sementes de casca cinza	Cinza × Cinza	705 cinzas 224 brancas 929 (total)	3,15 : 1
4. Textura das vagens Inflada × Comprimida	Vagens infladas	Inflada × Inflada	882 infladas 299 comprimidas 1.181 (total)	2,95 : 1
5. Cor das vagens Verde × Amarela	Vagens verdes	Verde × Verde	428 verdes 152 amarelas 580 (total)	2,82 : 1
6. Posição das flores Axilar × Terminal	Flores axilares	Axilar × Axilar	651 axilares 207 terminais 858 (total)	3,14 : 1
7. Altura da planta Alta × Anã	Planta alta	Alta × Alta	787 altas 277 anãs 1.064 (total)	2,84 : 1

O fato de as proporções entre os traços dominantes e recessivos serem tão parecidas em todas as características analisadas levou Mendel a pensar na existência de uma lei geral, responsável pela herança das características nas ervilhas.

Dedução da lei da segregação dos fatores

Para explicar o desaparecimento do caráter recessivo em F_1 e seu reaparecimento em F_2, na proporção de 3 dominantes para 1 recessivo, Mendel elaborou uma hipótese, cujas premissas são:

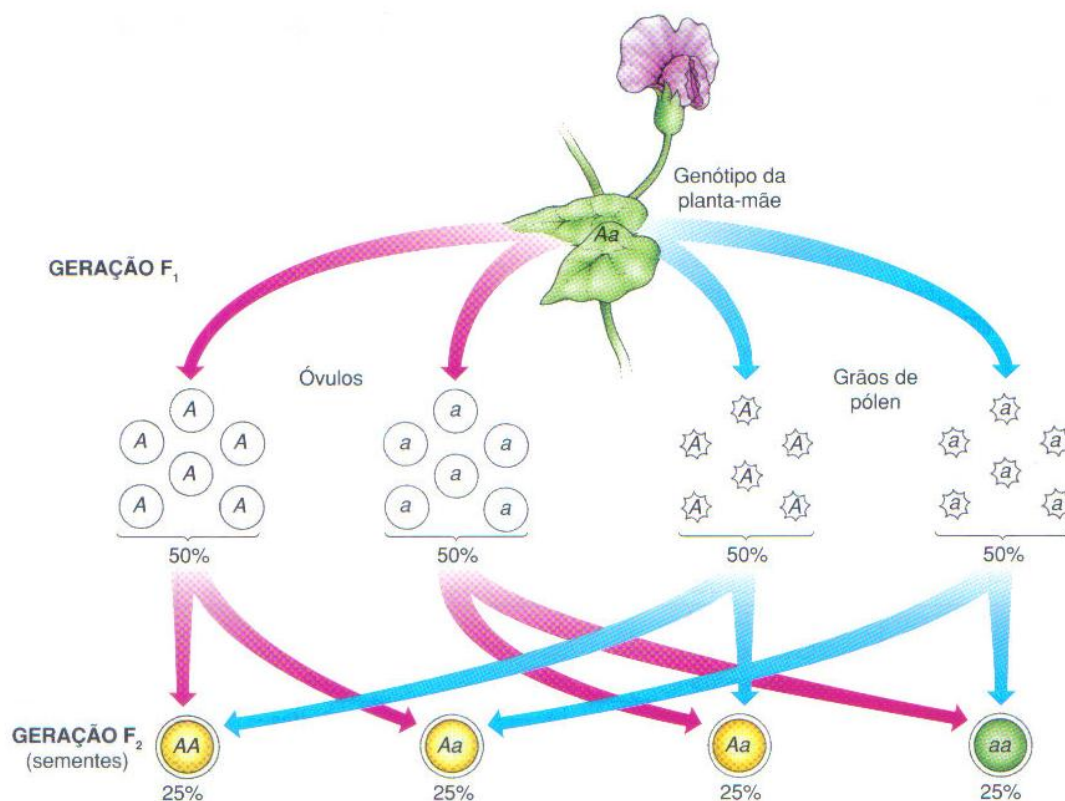
- cada característica hereditária é determinada por fatores, herdados em igual quantidade da mãe e do pai;
- os fatores de cada par separam-se (Mendel usou o termo "segregam-se") quando os indivíduos produzem gametas; se o indivíduo é puro quanto a determinada característica, todos os seus gametas terão o mesmo fator para aquela característica; se o indivíduo é híbrido, ele produzirá dois tipos de gameta em mesma proporção: metade com o fator para um dos traços e metade com o fator para o outro. Vejamos como o modelo imaginado por Mendel permite explicar os resultados obtidos nos cruzamentos entre plantas altas e plantas anãs.

Flores de uma planta alta pura, das quais haviam sido retiradas as anteras, recebem pólen de uma planta anã. De acordo com Mendel, cada óvulo da planta alta contém apenas o fator para esse traço (***A***). Cada grão de pólen da planta anã contém apenas o fator para baixa estatura (***a***). Cada semente produzida a partir do encontro de um óvulo com um grão de pólen será híbrida, isto é, terá os dois tipos de fatores (***Aa***). Uma vez que o fator para estatura alta é dominante sobre o fator para estatura baixa, as plantas híbridas serão todas altas.

Quando uma planta híbrida forma gametas, os fatores para a característica em questão segregam-se, de modo que cada gameta recebe um ou outro fator, nunca os dois simultaneamente. Assim, cerca de metade dos óvulos produzidos pela planta híbrida conterá o fator para estatura alta (***A***) e a outra metade, o fator para estatura baixa (***a***). O mesmo acontece com os grãos de pólen.

Na autofecundação dos híbridos, quatro tipos de encontro de gametas são possíveis:

1. óvulo com fator para estatura alta (***A***) e pólen com fator para estatura alta (***A***);
2. óvulo com fator para estatura alta (***A***) e pólen com fator para estatura baixa (***a***);
3. óvulo com fator para estatura baixa (***a***) e pólen com fator para estatura alta (***A***);
4. óvulo com fator para estatura baixa (***a***) e pólen com fator para estatura baixa (***a***).

Na situação 1, as sementes serão altas puras; nos casos 2 e 3, serão altas híbridas; no caso 4, serão anãs. Uma vez que os quatro tipos de encontro de gametas têm a mesma chance de ocorrer, formam-se três plantas altas para cada planta anã. **(Fig. 2.5)**

▲ **Figura 2.5** • Representação da segregação dos alelos de um gene em uma planta heterozigótica e da combinação aleatória dos gametas na formação da geração seguinte.

Assim, o aspecto essencial da hipótese proposta por Mendel é a separação dos fatores hereditários na formação dos gametas. Esse princípio ficou conhecido como **lei da segregação dos fatores**, ou **primeira lei de Mendel**, e pode ser enunciado como a seguir.

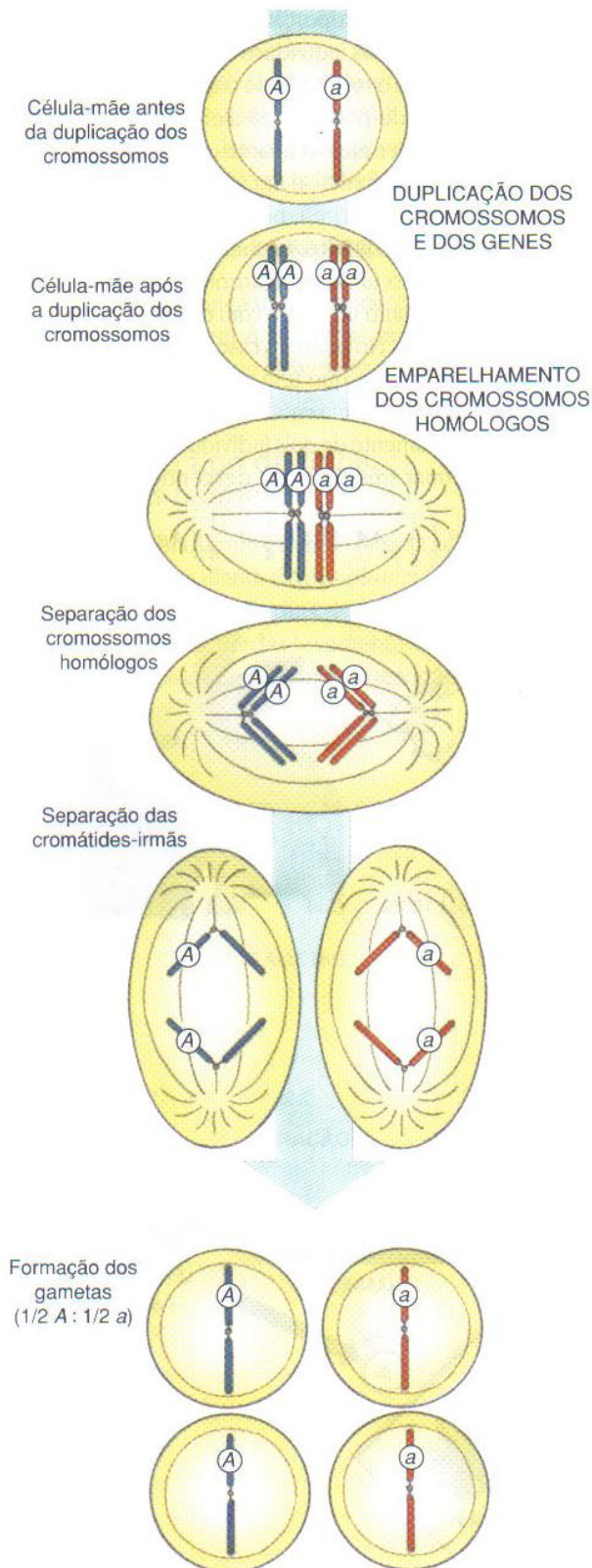
Os fatores que condicionam uma característica segregam-se (separam-se) na formação dos gametas; estes, portanto, são puros com relação a cada fator.

2.2 Bases celulares da segregação dos fatores genéticos

A redescoberta dos trabalhos de Mendel, em 1900, e sua aceitação pelos cientistas originaram outras questões: onde se localizam, nas células, os fatores hereditários? Qual é o mecanismo responsável por sua segregação durante a formação dos gametas?

Em 1902, enquanto estudava a formação dos gametas em gafanhotos, o norte-americano Walter S. Sutton (1877-1916) notou surpreendente semelhança entre o comportamento dos cromossomos homólogos, que se separam durante a meiose, e os fatores imaginados por Mendel. Sutton apresentou a hipótese de que os pares de fatores hereditários estariam localizados em cromossomos homólogos, de tal maneira que sua separação na meiose levaria à segregação dos fatores. Na mesma época, o pesquisador alemão Boveri também propôs a hipótese de que os fatores hereditários estariam localizados nos cromossomos.

Hoje sabemos que os fatores a que Mendel se referiu são os **genes** (do grego *genos*, que origina) e que eles realmente estão localizados nos cromossomos, como Sutton e Boveri haviam previsto. O par de fatores imaginado por Mendel corresponde ao par de alelos de um gene, localizados em um par de cromossomos homólogos. É a separação dos cromossomos homólogos na divisão I da meiose o fenômeno responsável pela segregação dos fatores hereditários. **(Fig. 2.6)**

A descoberta da lei da segregação, chave para a compreensão da herança biológica, ilustra o poder do modo científico de pensar e proceder. Mesmo sem conhecer a natureza e a localização dos fatores genéticos, Mendel descobriu a lei que rege seu comportamento. Seus sucessores terminaram de montar o quebra-cabeça da segregação, o que constituiu um grande avanço da Citologia e permitiu descobrir o que eram e onde se localizavam os fatores genéticos.

▲ **Figura 2.6** • Ilustração da idéia originalmente proposta por Walter S. Sutton, em 1902, de que a segregação de um par de alelos resulta da separação dos cromossomos homólogos na meiose. A hipótese de Sutton foi confirmada e passou a constituir um dos fundamentos da Genética.

2.3 A universalidade da primeira lei de Mendel

Os fundamentos da hereditariedade, estabelecidos no início do século XX, podem ser resumidos nos seguintes princípios:

- os filhos herdam dos pais "instruções genéticas", os **genes**, a partir das quais desenvolvem suas características;
- os genes são transmitidos pelos **gametas**;
- cada gameta contém um conjunto completo de genes (um **genoma**), típico da espécie;
- os genes ocorrem aos pares em cada indivíduo, pois este se forma pela fusão de dois gametas, um de origem materna e o outro de origem paterna (**fecundação**);
- as duas versões de cada gene, uma recebida do pai e outra da mãe, são denominadas **alelos**, e não se misturam no filho, separando-se quando este forma gametas.

Um exemplo de cruzamento genético

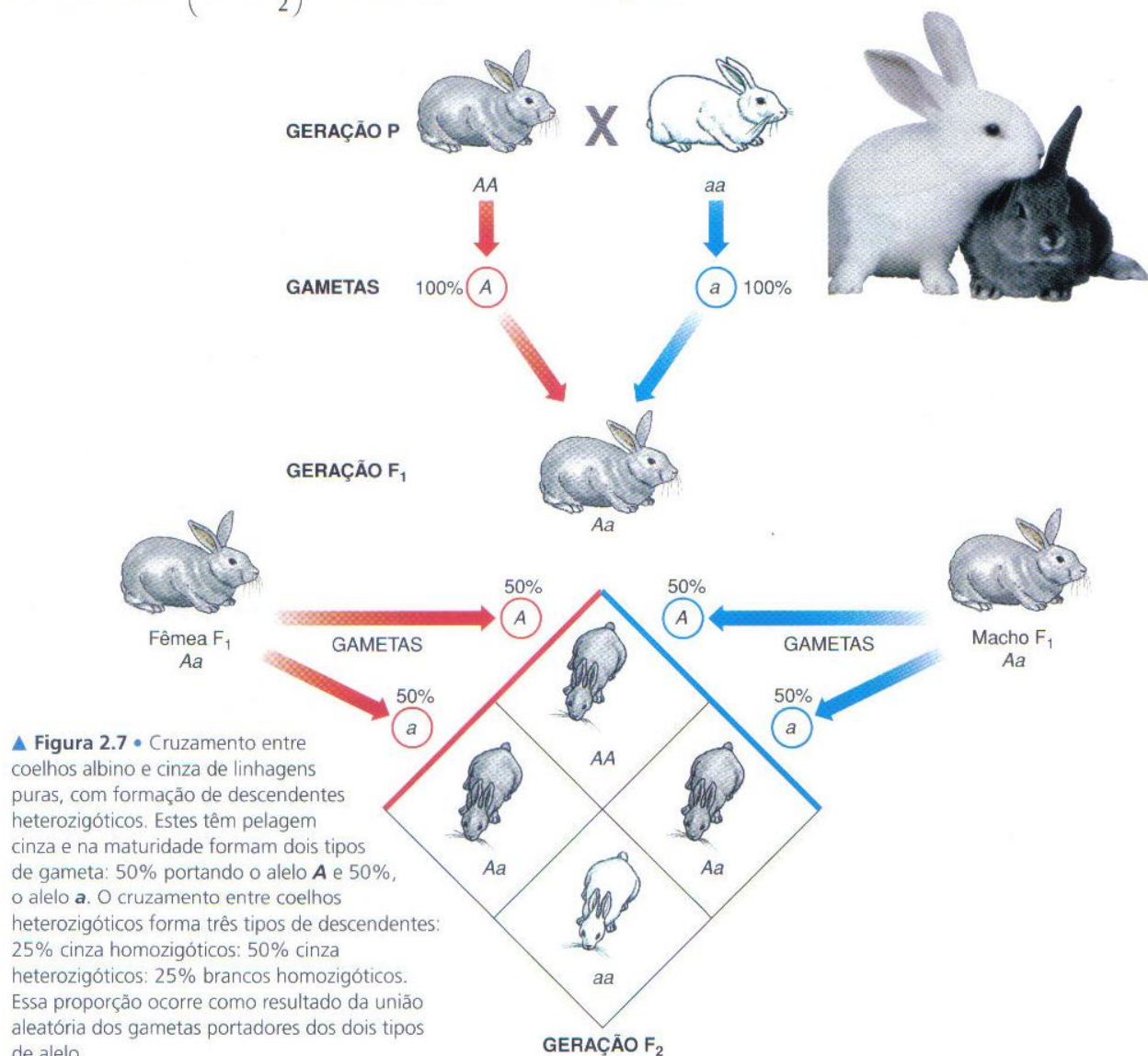
Os princípios fundamentais da hereditariedade podem ser exemplificados no cruzamento entre coelhos de duas linhagens que diferem quanto à cor da pelagem: em uma delas, os coelhos têm pelagem branca (albina) e na outra, pelagem cinza (chinchila). Hoje sabemos que os coelhos albinos possuem uma versão alterada de um dos genes responsáveis pela coloração da pelagem; por isso, eles são incapazes de produzir o pigmento que dá cor aos pêlos, a melanina. Coelhos de pelagem chinchila apresentam uma versão do gene com instrução para produção de pigmentos, que dão cor cinza aos pêlos. Vamos chamar a versão alterada desse gene de ***a***, e a versão funcional, que condiciona pelagem cinza, de ***A***. Os geneticistas chamam as versões de um mesmo gene de alelos; portanto ***A*** e ***a*** são dois alelos do gene para cor da pelagem de coelho.

Coelhos de linhagem chinchila pura só produzem gametas portadores do alelo ***A***, pois esse é o único tipo de alelo que apresentam. Coelhos albinos só produzem gametas portadores do alelo ***a***, pois têm apenas essa versão do gene. Os descendentes do cruzamento entre coelhos chinchilas puros e coelhos albinos recebem um alelo ***A*** de um dos pais e um alelo ***a*** do outro. Eles têm, portanto, constituição genética ***Aa***.

O indivíduo portador de dois alelos iguais de um gene é denominado **homozigótico** (chamado de puro por Mendel). Se apresentar dois alelos diferentes do gene, o indivíduo será chamado de **heterozigótico** (chamado de híbrido por Mendel). Em nosso exemplo, os

coelhos das linhagens chinchila e albina são homozigóticos ***AA*** e ***aa***, respectivamente. Os descendentes do cruzamento entre coelhos dessas duas linhagens são todos heterozigóticos ***Aa***, com pelagem cinza. Basta um alelo funcional (***A***) para produzir pigmentos do pêlo em quantidades normais.

Como mencionamos anteriormente, um dos princípios fundamentais da Genética é que os alelos de um gene, recebidos do pai e da mãe, não se misturam no indivíduo e voltam a se separar quando este forma gametas. Assim, quando os coelhos heterozigóticos ***Aa*** formarem gametas, os dois tipos de alelos se separarão, cada um em um gameta. Um coelho heterozigótico ***Aa*** formará, portanto, dois tipos de gameta quanto ao gene para cor da pelagem: metade $\left(50\% \text{ ou } \frac{1}{2}\right)$ com o alelo ***A*** e a outra metade $\left(50\% \text{ ou } \frac{1}{2}\right)$ com o alelo ***a***.

Conhecendo a proporção entre os dois tipos de gameta formados pelos indivíduos heterozigóticos, pode-se prever qual será o resultado do cruzamento entre eles. Um espermatozóide portador do alelo ***A*** pode fecundar tanto um óvulo com o alelo ***A*** quanto um óvulo com o alelo ***a***. No primeiro caso, forma-se um indivíduo homozigótico ***AA***, que terá pelagem cinza; no segundo caso, forma-se um indivíduo heterozigótico ***Aa***, também de pelagem cinza. Do mesmo modo, um espermatozóide portador do alelo ***a*** pode fecundar tanto um óvulo com o alelo ***A*** quanto um óvulo com o alelo ***a***. No primeiro caso, forma-se um indivíduo heterozigótico ***Aa***, que terá pelagem cinza e, no segundo, um indivíduo homozigótico ***aa*** de pelagem branca. Portanto, no cruzamento de dois indivíduos heterozigóticos podem-se formar três tipos de descendentes, na proporção de 25% $\left(\frac{1}{4}\right)$ ***AA*** : 50% $\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right)$ ***Aa*** : 25% $\left(\frac{1}{4}\right)$ ***aa***. **(Fig. 2.7)**

▲ **Figura 2.7** • Cruzamento entre coelhos albino e cinza de linhagens puras, com formação de descendentes heterozigóticos. Estes têm pelagem cinza e na maturidade formam dois tipos de gameta: 50% portando o alelo ***A*** e 50%, o alelo ***a***. O cruzamento entre coelhos heterozigóticos forma três tipos de descendentes: 25% cinza homozigóticos: 50% cinza heterozigóticos: 25% brancos homozigóticos. Essa proporção ocorre como resultado da união aleatória dos gametas portadores dos dois tipos de alelo.

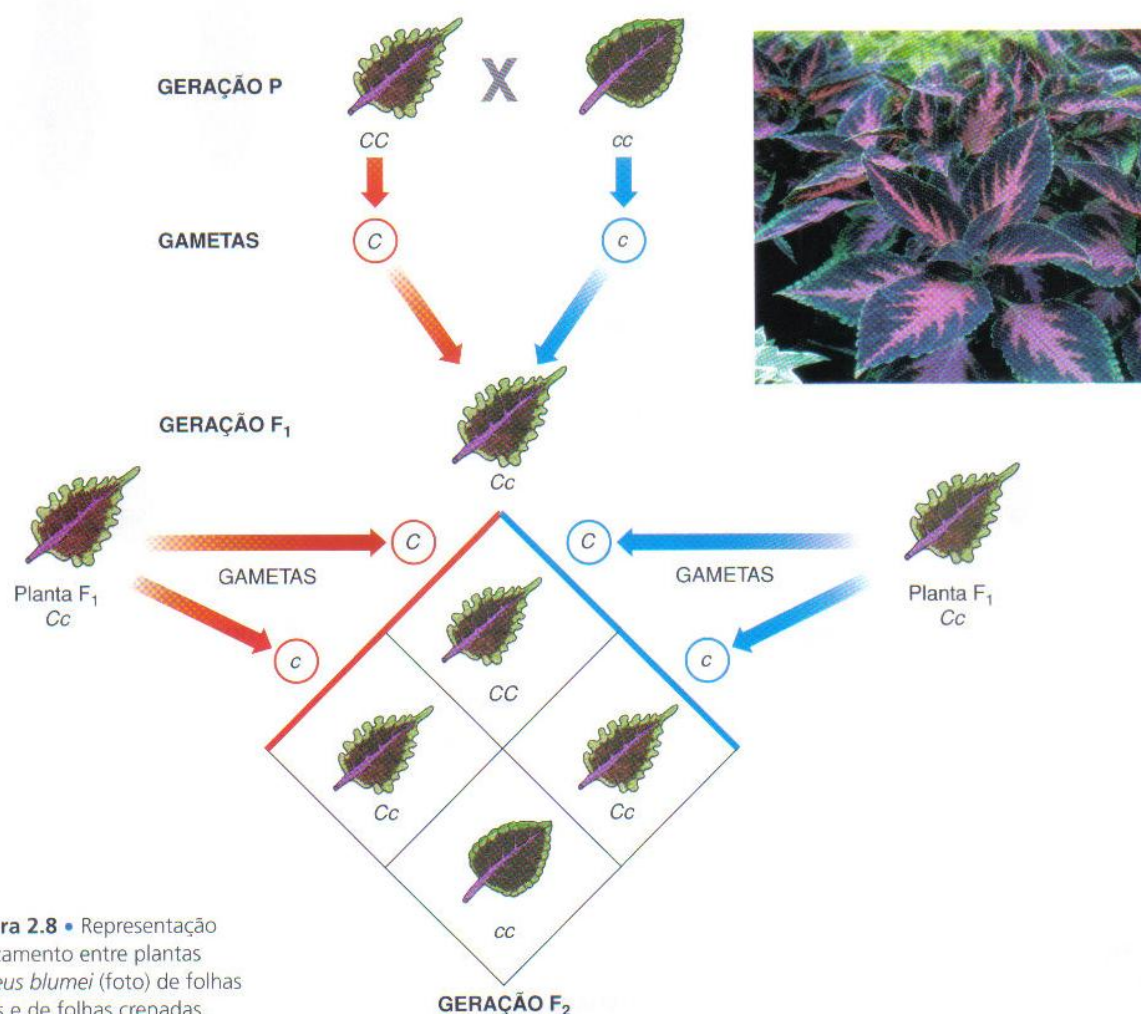
Como Mendel sugeriu, as características hereditárias da maioria dos organismos são condicionadas por pares de alelos, que passam de uma geração a outra pelos gametas. Um gameta transporta apenas um alelo de cada gene, e a fecundação permite a reunião dos alelos provenientes de dois indivíduos diferentes.

Exemplos de herança monogênica

O termo **herança monogênica**, ou **monoibridismo**, aplica-se a casos em que apenas um par de alelos de um gene está envolvido na herança da característica. Veja a seguir alguns exemplos desse tipo de herança.

Herança do tipo de folha em *Coleus blumei*

Vamos estudar um exemplo da aplicação da primeira lei de Mendel na planta *Coleus blumei* (cóleo), utilizada na ornamentação de jardins. Nessa espécie, as folhas podem apresentar bordas levemente onduladas — crenadas — ou bordas profundamente recortadas — lobadas. Esses traços são condicionados por dois alelos de um gene: o alelo que condiciona folha lobada é dominante sobre o que condiciona folha crenada. Os genes costumam ser representados por letras em itálico, sendo a forma maiúscula da letra indicativa de um tipo de alelo, em geral do dominante, e a minúscula, indicativa do outro alelo, em geral do recessivo. A letra representativa do gene é, em geral, a inicial do estado recessivo do caráter. No caso do caráter forma da borda das folhas em cóleo, o alelo que condiciona o traço crenado (recessivo) costuma ser representado por ***c***, e o condicionante do traço folhas lobadas (dominante), por ***C***.

Quando indivíduos homozigóticos dessas duas variedades de planta são cruzados entre si, todos os indivíduos da geração F_1 apresentam folhas lobadas. O cruzamento de indivíduos da geração F_1 entre si produz uma geração F_2 constituída por 75% $\left(\text{ou } \frac{3}{4}\right)$ de plantas com folhas lobadas e 25% $\left(\text{ou } \frac{1}{4}\right)$ com folhas crenadas, ou seja, uma proporção de 3 lobadas : 1 crenada. **(Fig. 2.8)**

▲ **Figura 2.8** • Representação do cruzamento entre plantas de *Coleus blumei* (foto) de folhas lobadas e de folhas crenadas.

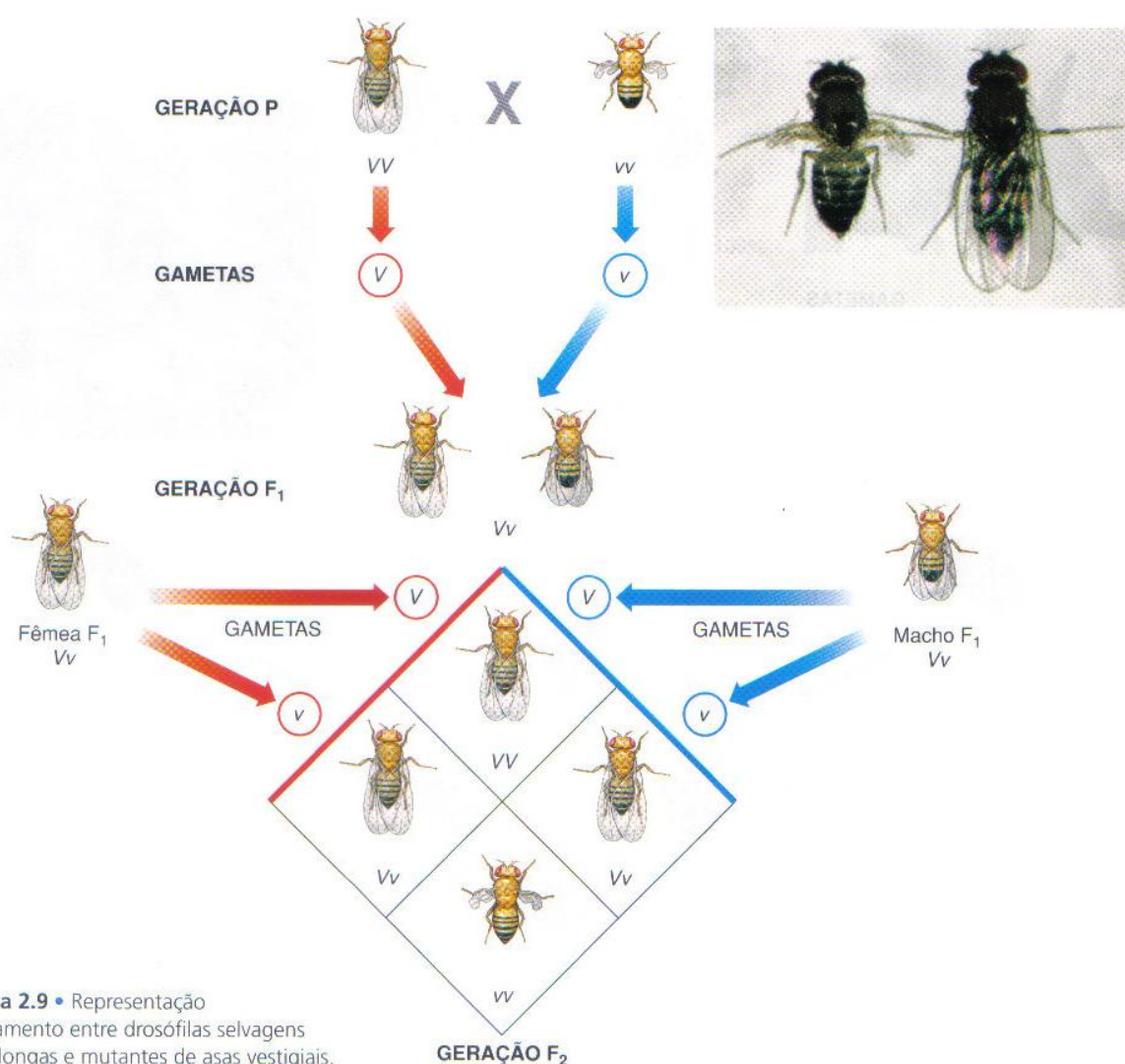
O quadrado de Punnett

O cruzamento entre dois indivíduos heterozigóticos, como o que acabamos de ver, pode ser esquematizado na forma de uma tabela com duas colunas, correspondentes aos gametas de um dos sexos, e com duas linhas, correspondentes aos gametas do sexo oposto. Esse tipo de representação, muito utilizado em Genética, é conhecido como **quadrado de Punnett** em homenagem a seu inventor, o geneticista inglês Reginald Crundall Punnett (1875-1967). Veja a seguir o quadrado de Punnett para o cruzamento de cóleo.

Gametas ♂ \ Gametas ♀	$\frac{1}{2}C$	$\frac{1}{2}c$
$\frac{1}{2}C$	$\frac{1}{4}CC$	$\frac{1}{4}Cc$
$\frac{1}{2}c$	$\frac{1}{4}Cc$	$\frac{1}{4}cc$

Herança do tipo de asa em drosófila

Drosophila melanogaster, uma pequena mosca conhecida popularmente como mosca-do-vinagre, ou mosca-da-banana, apresenta asas com forma elíptica, ligeiramente alongadas. Os geneticistas usam o termo **selvagem** para referir-se às características apresentadas pelos indivíduos que vivem na natureza; assim, asa longa é uma característica selvagem da drosófila. As características hereditárias que diferem das selvagens e que, em geral, só estão presentes em populações ou linhagens criadas em laboratório são chamadas de **mutantes**. Entre as diversas linhagens mutantes de drosófila, há uma que apresenta apenas rudimentos de asas, característica conhecida como **asa vestigial**. **(Fig. 2.9)**

O cruzamento de moscas homozigóticas selvagens (asas longas) com moscas homozigóticas de asas vestigiais produz apenas descendentes de asas longas. Em um experimento em que moscas da geração F_1 com

▲ **Figura 2.9** • Representação do cruzamento entre drosófilas selvagens de asas longas e mutantes de asas vestigiais.

essas características foram cruzadas entre si, obtiveram-se em F_2 533 descendentes, dos quais 404 tinham asas longas e 129 tinham asas vestigiais.

Fazendo os cálculos, chegamos à proporção de 3,13 moscas de asas longas para 1 mosca de asa vestigial $\left(\frac{404}{129} : \frac{129}{129}\right)$. Essa proporção obtida na prática é muito próxima da proporção teórica 3 : 1, o que permite concluir que a característica "tipo de asa" nessas moscas está sendo condicionada por um gene com dois alelos, um dominante (o que condiciona asas longas) e outro recessivo (o que condiciona asas vestigiais).

Herança da sensibilidade ao PTC na espécie humana

Uma característica com padrão de herança monogênica na espécie humana é a sensibilidade ao PTC, sigla da substância denominada feniltiocarbamida, ou feniltiouréia (do inglês, ***phenylthiocarbamide***). Algumas pessoas são capazes de sentir um sabor amargo em soluções muito diluídas de PTC, enquanto outras não sentem sabor algum. Esses traços têm herança monogênica simples, sendo o alelo condicionante da sensibilidade ao PTC (***T***) dominante sobre o alelo condicionante da insensibilidade (***t***). A sigla ***t*** para a denominação desse alelo deriva da palavra inglesa *tasteless*, que significa "sem sabor".

Casais heterozigóticos quanto a esse gene (***Tt***) podem gerar três tipos de filhos na proporção de 1 ***TT*** : 2 ***Tt*** : 1 ***tt***, de acordo com o esquema a seguir. Como os indivíduos homozigóticos dominantes (***TT***) e heterozigóticos (***Tt***) sentem o sabor amargo do PTC, os filhos dos casais distribuem-se na proporção de 3 sensíveis (1 ***TT*** + 2 ***Tt***) para 1 insensível (1***tt***).

Pais heterozigóticos	***Tt***	×	***Tt***	
Gametas	$\frac{1}{2}T \times \frac{1}{2}t$		$\frac{1}{2}T \times \frac{1}{2}t$	
Filhos	$\frac{1}{4}TT$	: $\frac{2}{4}Tt$	:	$\frac{1}{4}tt$
	$\frac{3}{4}$ sensíveis	:	$\frac{1}{4}$ insensíveis	

LEITURA

Gregor Mendel

Até hoje um ar de mistério envolve o nome de Gregor Mendel, o monge que lançou as bases da Genética. Uma pergunta que muitos fazem é: "Qual foi, realmente, a contribuição de Mendel à Genética e por que seu trabalho foi ignorado na época?"

Foi para responder a questões como essa que William Bateson (1861-1926) visitou Brünn, no inverno de 1904, à procura de documentos. Por motivos desconhecidos, o abade sucessor de Mendel havia queimado todos os papéis particulares do monge cientista. Afortunadamente, os documentos oficiais de Mendel permaneceram nos arquivos do mosteiro, onde foram posteriormente descobertos por um jovem padre, Anselm Matousek.

Quando Bateson visitou o mosteiro, Matousek ainda era um seminarista. Tão logo se ordenou, em 1906, Matousek começou a coletar relíquias e manuscritos relacionados a Mendel. Nesse trabalho teve a colaboração de Hugo Iltis, um jovem professor da escola secundária de Brünn.

O material descoberto por esses dois homens sobreviveu, quase que por milagre, a duas guerras mundiais e às subseqüentes instabilidades políticas e científicas da então Tchecoslováquia. Hoje se encontra reunido no Mendel Memorial Hall, sob a guarda dos membros do Departamento de Genética Gregor Mendel do Museu da Morávia. Ali podem ser vistos os exames escolares de Mendel, uma breve autobiografia, anotações feitas na época de estudante e suas cartas ao biólogo Nagëli, para citar apenas os itens mais importantes.

Apesar de tudo o que foi descoberto e preservado, não se tem informação sobre as fontes de inspiração de Mendel, nem por que não atraiu o interesse de algum outro cientista de seu tempo.

Mendel concluiu seus experimentos com *Pisum sativum* (ervilha-de-cheiro) em 1863. Ele sabia que seus resultados não eram compatíveis com o conhecimento científico da época, e que a publicação do experimento isolado seria perigosa. Por isso realizou experiências também com outras plantas, para confirmar os resultados. Primeiramente, Mendel cruzou o feijão *Phaseolus vulgaris* com *Phaseolus nanus*, e obteve claramente a relação de 3 : 1 para três pares de caracteres contrastantes analisados. Cruzou, então, *P. nanus* com *Phaseolus multiflorus*, e novamente obteve a relação de 3 : 1. Infelizmente Mendel não mencionou os números de indivíduos analisados.

Seus trabalhos com *Pisum* foram apresentados em duas reuniões da Sociedade de História Natural de Brno, em 8 de fevereiro e 8 de março de 1865, mas ninguém se interessou em repetir os experimentos. Apesar da falta de interesse, a Sociedade solicitou a Mendel que publicasse sua conferência, em 1866.

Na primeira página do manuscrito dessa publicação está escrito "40 separatadruck", isto é, quarenta cópias avulsas. Não se sabe se ele enviou todas essas quarenta cópias, mas apenas quatro delas foram localizadas até agora. Além disso, 150 exemplares do número da revista que continha o referido artigo foram enviados pela Sociedade: doze para endereços locais, oito para Berlim, seis para Viena, quatro para os EUA e dois para a Inglaterra. É incrível que Mendel não tenha conseguido despertar nenhum interesse na Sociedade local ou em qualquer das instituições para as quais a revista foi enviada.

Na primavera de 1868, Mendel foi indicado abade do mosteiro. Em maio ele escreveu para seu colega Nagëli, contando a respeito da promoção: "... aconteceu uma virada inesperada em meus afazeres. Em 3 de março, minha modesta pessoa foi eleita chefe vitalício do mosteiro ao qual pertenço. Da modesta posição de professor de Física Experimental, vi-me movido para uma esfera que me parece muito estranha, e levará algum tempo e esforço antes que eu me sinta à vontade nela. Isso não me impedirá de dar continuidade aos experimentos de hibridização, dos quais me tornei tão aficionado; espero mesmo poder devotar mais tempo e atenção a eles, tão logo me torne mais familiarizado com minha nova posição".

Infelizmente, Mendel nunca mais encontrou o tempo livre que esperava, e seus estudos sobre híbridos pararam no final de 1871. Os anos subseqüentes foram muito difíceis, tanto pela teimosia de Mendel em se recusar a pagar as novas taxas eclesiásticas do mosteiro como por problemas de saúde. Ele passou a fumar demais, cerca de vinte cigarros por dia, e seu sobrinho Alois Schindler recorda-se de que a pulsação de Mendel chegava muitas vezes a 120 batidas por minuto. Em janeiro de 1884, o jornal de Brno, *Brünner Tagesbote*, prestou a seguinte homenagem a Mendel: "Sua morte tira dos pobres um benfeitor, e da humanidade um grande homem, de nobre caráter, alguém que foi um amigo cordial, um promotor das ciências naturais e um padre exemplar".

• **Fonte:** Robert Olby, *Origins of Mendelism*, 2ª ed. Chicago: The University of Chicago Press Ltd., 1985. *(Tradução e adaptação nossa.)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

2.1 A descoberta da lei da segregação

1. Cite, explicando brevemente, por que as ervilhas escolhidas por Mendel são um material biológico adequado a estudos genéticos.

2. O que é autofecundação? Por que ela ocorre normalmente em flores de ervilha?

3. Como se deve proceder para realizar artificialmente a fecundação cruzada?

4. O que eram plantas puras e híbridas, de acordo com Mendel?

5. De acordo com Mendel, o que são traços dominantes e recessivos? Exemplifique.

6. Por que o trabalho de Mendel inovou em relação ao de seus antecessores?

7. Qual foi a conclusão de Mendel ao constatar que, na geração F_2 de diversos tipos de cruzamento, as proporções eram sempre próximas de 3 : 1?

8. Como Mendel explicou a proporção de 3 : 1 obtida em seus cruzamentos com ervilhas?

9. Qual é o aspecto essencial da hipótese de Mendel e por que é chamada de lei da segregação dos fatores, ou primeira lei de Mendel?

2.2 Bases celulares da segregação dos fatores genéticos

10. Em que consistia a hipótese de Sutton para a segregação dos fatores? E a de Boveri?

11. De acordo com a Genética moderna, o que são e onde se localizam os fatores descobertos por Mendel?

2.3 A universalidade da primeira lei de Mendel

12. Comente alguns fundamentos da Genética elaborados a partir de 1900.

13. O que são indivíduos homozigóticos e heterozigóticos? Exemplifique.

14. O que é herança monogênica, ou monoibridismo? Exemplifique.

15. O que é o quadrado de Punnett?

16. O que significam os termos: selvagem e mutante, em relação a uma característica geneticamente controlada? Exemplifique.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 17 a 22.

a) Diplóide.
b) Haplóide.
c) Heterozigótico(a).
d) Homozigótico(a).

17. Gametas apresentam um genoma. Qual é sua constituição?

18. O zigoto apresenta dois genomas, um de origem materna e outro de origem paterna. Qual é sua constituição?

19. Que tipo de indivíduo é originado pela união de gametas portadores do mesmo tipo de alelo de um gene?

20. Que tipo de indivíduo é originado pela união de gametas portadores de alelos diferentes de um gene?

21. Considerando-se um único par de alelos, qual é o nome que se dá ao indivíduo que forma apenas um tipo de gameta?

22. Considerando-se um único par de alelos, qual é o nome que se dá ao indivíduo que forma dois tipos de gameta?

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 23 e 24.

a) Duas células, cada uma com os alelos *A* e *a*.
b) Duas células, uma com o alelo *A* e a outra com alelo *a*.
c) Quatro células, cada uma com os alelos *A* e *a*.
d) Quatro células, duas com o alelo *A* e duas com o alelo *a*.

23. Quais os produtos de uma célula *Aa*, ao final da meiose?

24. Quais os produtos de uma célula *Aa*, ao final da mitose?

25. No cruzamento de dois indivíduos heterozigóticos *Aa* espera-se obter

a) apenas indivíduos *Aa*.
b) indivíduos *AA* e *aa*, na proporção de 3 : 1, respectivamente.
c) indivíduos *AA* e *aa*, na proporção de 1 : 1, respectivamente.
d) indivíduos *AA*, *Aa* e *aa*, na proporção de 1 : 2 : 1, respectivamente.

26. O cruzamento de dois indivíduos heterozigóticos para um gene com um alelo dominante e outro recessivo produzirá descendência constituída por

a) 100% de indivíduos com o traço dominante.
b) 75% de indivíduos com o traço dominante e 25% com o traço recessivo.
c) 50% de indivíduos com o traço dominante e 50% com o traço recessivo.
d) 25% de indivíduos com o traço dominante, 25% com o traço recessivo e 50% com traços intermediários.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 27 e 28.

a) 1 : 1 b) 3 : 1 c) 1 : 2 : 1 d) 1 : 1 : 1 : 1

27. Qual é a proporção de tipos de gametas formados por um indivíduo heterozigótico para um par de alelos?

28. Qual é proporção de traços dominantes e recessivos no cruzamento de indivíduos heterozigóticos, para uma característica em que um dos alelos é dominante sobre o outro?

QUESTÕES DISCURSIVAS

29. Em seus experimentos com ervilhas, Mendel cruzou plantas puras produtoras de sementes amarelas com plantas produtoras de sementes verdes. Ele verificou que todas as sementes F_1 eram amarelas, enquanto em F_2, num total de 8.023 sementes analisadas, 6.022 eram amarelas e 2.001 eram verdes.

a) Determine a relação de dominância entre os caracteres em questão.

b) Determine a proporção entre as duas classes fenotípicas de F_2.

c) Esses resultados estão de acordo com o esperado pela lei da segregação?

30. O que você esperaria obter no cruzamento de uma planta híbrida quanto a um par de fatores (*Aa*) com uma planta pura recessiva (*aa*)?

31. Suponhamos o cruzamento de linhagens puras amarelas com verdes, em ervilhas. A autofecundação de F_1 produz uma F_2 constituída de ervilhas amarelas e verdes. Qual a fração das ervilhas amarelas que se supõe sejam heterozigóticas?

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

32. (Fuvest) Em plantas de ervilha ocorre, normalmente, autofecundação. Para estudar os mecanismos de herança, Mendel fez fecundações cruzadas, removendo as anteras da flor de uma planta homozigótica de alta estatura e colocando, sobre seu estigma, pólen recolhido da flor de uma planta homozigótica de baixa estatura. Com esse procedimento, o pesquisador:

a) impediu o amadurecimento dos gametas femininos.

b) trouxe gametas femininos com alelos para baixa estatura.

c) trouxe gametas masculinos com alelos para baixa estatura.

d) promoveu o encontro de gametas com os mesmos alelos para estatura.

e) impediu o encontro de gametas com alelos diferentes para estatura.

33. (UFPI) Uma ovelha branca ao cruzar com um carneiro branco teve um filhote de cor preta. Quais os genótipos dos pais, se a cor branca é dominante?

a) Ambos são homozigotos recessivos.

b) Ambos são brancos heterozigotos.

c) Ambos são homozigotos dominantes.

d) A mãe é Bb e o pai é BB.

e) A mãe é bb e o pai é Bb.

34. (Ufla-MG) A primeira Lei de Mendel refere-se:

a) ao efeito do ambiente para formar o fenótipo.

b) à segregação do par de alelos durante a formação dos gametas.

c) à ocorrência de fenótipos diferentes em uma população.

d) à ocorrência de genótipos diferentes em uma população.

e) à união dos gametas para formar o zigoto.

35. (FGV-SP) Sabe-se que o casamento consangüíneo, ou seja, entre indivíduos que são parentes próximos, resulta numa maior freqüência de indivíduos com anomalias genéticas. Isso pode ser justificado pelo fato de os filhos apresentarem:

a) maior probabilidade de heterozigoses recessivas.

b) maior probabilidade de homozigozes recessivas.

c) menor probabilidade de heterozigoses dominantes.

d) menor probabilidade de homozigoses dominantes.

e) menor probabilidade de homozigoses recessivas.

36. (Fuvest) Em uma população de mariposas, 96% dos indivíduos têm cor clara e 4%, cor escura. Indivíduos escuros cruzados entre si produzem, na maioria das vezes, descendentes claros e escuros. Já os cruzamentos entre indivíduos claros produzem sempre apenas descendentes de cor clara. Esses resultados sugerem que a cor dessas mariposas é condicionada por:

a) um par de alelos, sendo o alelo para cor clara dominante sobre o que condiciona cor escura.

b) um par de alelos, sendo o alelo para cor escura dominante sobre o que condiciona cor clara.

c) um par de alelos, que não apresentam dominância um sobre o outro.

d) dois genes ligados com alta taxa de recombinação entre si.

e) fatores ambientais, como a coloração dos troncos onde elas pousam.

37. (Unimep-SP) Se uma planta do tipo cromossômico *aa* polinizar uma planta do tipo *AA*, que tipo cromossômico de embrião e endosperma poderíamos prever respectivamente nas sementes resultantes?

a) *AAa* e *Aa*.

b) *Aa* e *AAa*.

c) *aaa* e *AAA*.

d) *Aa* e *Aa*.

e) nenhuma das alternativas anteriores.

CAPÍTULO

3 RELAÇÃO ENTRE GENÓTIPO E FENÓTIPO

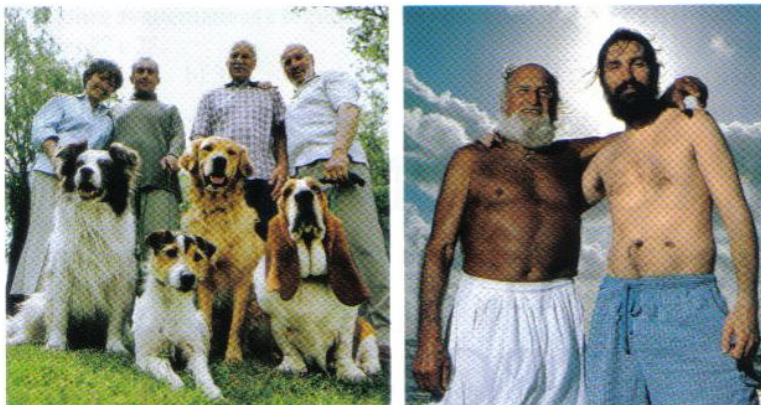
▶ Os diferentes padrões de pelagem nos coelhos da foto são produzidos por diferenças nos genótipos e na expressividade dos genes.

3.1 Os conceitos de genótipo e de fenótipo

Dois conceitos importantes em Genética, introduzidos na literatura científica pelo pesquisador dinamarquês Wilhelm L. Johannsen (1857-1927), em 1909, foram genótipo e fenótipo. O termo **genótipo** (do grego *genos*, originar, e *typos*, característica) refere-se à constituição genética do indivíduo, ou seja, aos tipos de alelos que ele possui. Quando dizemos que uma planta de ervilha é heterozigótica para a cor da semente, estamos nos referindo ao genótipo.

O termo **fenótipo** (do grego *pheno*, evidente, e *typos*, característica) é empregado para designar as características morfológicas, fisiológicas ou comportamentais apresentadas por um indivíduo, tais como a cor de uma flor, a cor dos olhos de uma pessoa, sua cor da pele e a textura do cabelo, a cor do pêlo de um animal, preferência sexual etc. O fenótipo também engloba características microscópicas e de natureza bioquímica, que necessitam de métodos especiais para sua identificação, como o tipo sangüíneo de uma pessoa e a seqüência de aminoácidos de uma proteína de um organismo.

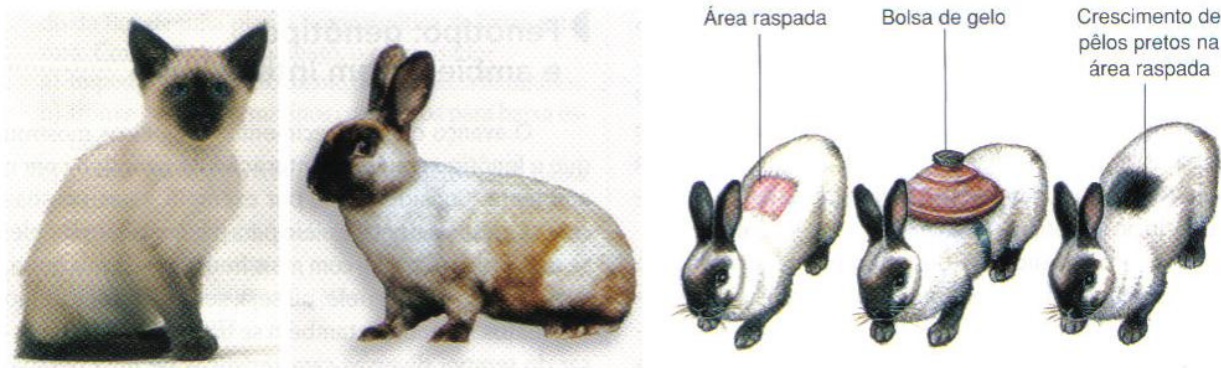
Fenótipo: genótipo e ambiente em interação

O avanço dos conhecimentos biológicos mostrou que o fenótipo resulta da **interação do genótipo com o ambiente**. Consideremos, por exemplo, duas pessoas com os mesmos tipos de alelo para pigmentação da pele; se uma delas toma sol com mais freqüência que a outra, suas tonalidades de pele, ou seja, seus fenótipos, serão diferentes. O fenótipo também se transforma com o passar do tempo; diversas características de uma pessoa, por exemplo cor dos cabelos, textura da pele etc., modificam-se com a idade. **(Fig. 3.1**, na página seguinte)

◄ **Figura 3.1** • **A.** Indivíduos de mesma espécie diferem em inúmeros traços fenotípicos. As diferenças entre as pessoas e entre os cães da foto, por exemplo, refletem suas diferentes constituições genéticas. **B.** A cor da pele sofre forte influência do ambiente. A foto mostra pessoas com diferentes tonalidades de pele pelo fato de uma delas ter ficado mais tempo exposta ao sol do que a outra.

Um exemplo bem estudado da interação entre genótipo e ambiente na produção do fenótipo é a reação dos coelhos da raça himalaia à temperatura. Esses animais têm pêlos pigmentados (pretos ou marrons) apenas nas extremidades corporais — focinho, orelhas, patas e rabo —, sendo o restante do corpo coberto por pêlos brancos, desprovidos de pigmento. Esse tipo de pelagem desenvolve-se apenas se os coelhos da raça himalaia estiverem em ambientes com temperatura entre 15 °C e 24 °C. Se forem criados em temperaturas abaixo de 2 °C, eles passam a ter pelagem pigmentada em todo o corpo. Por outro lado, animais criados em ambientes com temperaturas acima de 29 °C têm pelagem inteiramente branca.

Estudos genéticos e bioquímicos mostraram que, devido ao genótipo dos coelhos himalaias (veja a herança dessa característica mais adiante), a enzima responsável pela síntese do pigmento melanina só é ativa em células epidérmicas expostas a temperaturas inferiores a 15 °C. Quando esses animais vivem em ambientes entre 15 °C e 24 °C, ocorrem temperaturas inferiores a 15 °C apenas nas extremidades corporais, que perdem mais calor que o resto do corpo; nelas, portanto, a enzima para melanina é ativa e os pêlos são pretos; no resto do corpo, em que a temperatura se mantém mais elevada, a enzima é inibida e a pelagem é branca. Quando os coelhos são criados em temperaturas superiores a 29 °C, até mesmo a epiderme das extremidades do corpo permanece a temperaturas superiores a 15 °C, o que faz a pelagem ser totalmente branca. Em ambientes com temperaturas inferiores a 2 °C, a temperatura geral da epiderme não ultrapassa 15 °C; portanto, a enzima é ativa em todo o corpo, e a pelagem é totalmente pigmentada. Situação semelhante ocorre com o gato siamês.

Se rasparmos o pêlo do dorso de um coelho himalaia onde a pelagem é normalmente branca, mantendo-a resfriada com uma bolsa de gelo até o nascimento da nova pelagem, esta será pigmentada. **(Fig. 3.2)**

Outro exemplo da interação entre genótipo e ambiente na manifestação do fenótipo refere-se à produção de clorofila nas plantas. Os genes envolvidos na síntese desse pigmento são ativos somente na presença de luz. Plantas germinadas no escuro não produzem clorofila, apresentando fenótipo albino. Nessas condições, a planta sobrevive apenas enquanto duram as reservas de alimento da semente.

▲ **Figura 3.2** • Foto de gato siamês e coelho da raça himalaia. A ilustração representa um experimento que mostra a influência da temperatura na cor da pelagem nessa raça de coelhos.

Determinando o genótipo

O genótipo que um indivíduo apresenta é inferido a partir da observação de suas características fenotípicas e pela análise do fenótipo de seus pais ou de seus filhos.

Quando um indivíduo apresenta o fenótipo condicionado pelo alelo recessivo, conclui-se que ele é homozigótico quanto ao alelo em questão. Por exemplo, uma semente de ervilha com cotilédones verdes é homozigótica ***vv***. Por outro lado, o indivíduo que apresenta o fenótipo condicionado pelo alelo dominante de um gene pode ser tanto homozigótico como heterozigótico. Uma semente de ervilha com cotilédones amarelos, por exemplo, pode ter genótipo ***VV*** ou ***Vv***. Nesse caso, pode-se tentar determinar o genótipo pela análise dos genitores ou da descendência.

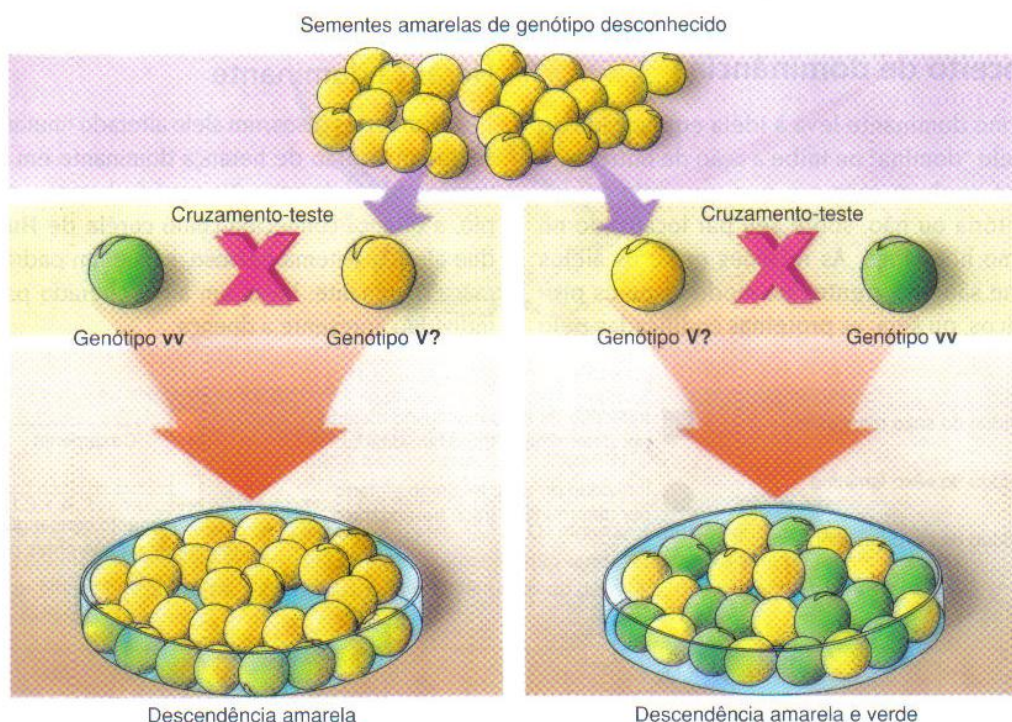
Se um indivíduo com fenótipo dominante tem um dos pais com fenótipo recessivo, isso permite concluir que seu genótipo é heterozigótico, pois o indivíduo herdou daquele genitor um alelo recessivo. Entretanto, se ambos os pais do indivíduo apresentam fenótipo dominante, como ele, nada se pode concluir sobre seu genótipo. Pode-se tentar determinar o genótipo, também, pela descendência do indivíduo: se algum de seus filhos exibe fenótipo recessivo, concluímos que ele é heterozigótico.

Cruzamento-teste

Uma maneira amplamente utilizada para determinar o genótipo de um indivíduo com fenótipo dominante é o **cruzamento-teste**. Este consiste em cruzar o indivíduo de fenótipo dominante com um indivíduo de fenótipo recessivo e, portanto, necessariamente homozigótico.

Se entre os descendentes de um cruzamento-teste houver tanto indivíduos com fenótipo dominante quanto com fenótipo recessivo, conclui-se que o indivíduo testado é heterozigótico. Se, por outro lado, a descendência é grande e todos os descendentes têm fenótipo dominante, esse é um bom indicativo de que o indivíduo testado é homozigótico dominante.

Por exemplo, se cruzarmos uma planta de ervilha de cotilédones amarelos, cujo genótipo pode ser ***VV*** ou ***Vv***, com uma planta de cotilédones verdes (***vv***), e surgirem descendentes verdes (***vv***), teremos certeza de que o tipo parental amarelo é heterozigótico (***Vv***). Por outro lado, se uma descendência grande é inteiramente amarela, é bem provável que o tipo parental amarelo seja homozigótico ***VV***. **(Fig. 3.3)**

Algumas vezes o cruzamento-teste é chamado **retrocruzamento** (do latim *retro*, para trás), termo utilizado para indicar que o indivíduo da geração F_2, possuidor do fenótipo dominante, é cruzado com um indivíduo de fenótipo recessivo, como um de seus avós.

▲ **Figura 3.3** • Cruzamento-teste em ervilhas. A ervilha amarela testada no cruzamento à esquerda é, muito provavelmente, homozigótica (*VV*), pois sua descendência é inteiramente constituída por sementes amarelas. Por outro lado, a ervilha amarela testada no cruzamento à direita é, com certeza, heterozigótica (*Vv*), pois em sua descendência há indivíduos verdes, recessivos (*vv*).

Construindo um heredograma

Heredograma (do latim *heredium*, herança) é a representação gráfica das relações de parentesco entre os indivíduos de uma família. Cada indivíduo é representado por um símbolo, que indica suas características particulares e sua relação de parentesco com os demais. Geralmente, indivíduos do sexo masculino são representados por quadrados e do sexo feminino, por círculos. O casamento, no sentido biológico de procriação, é indicado por um traço horizontal que une os dois membros do casal. Os filhos de um casamento são representados por traços verticais unidos ao traço horizontal do casal. Veja, na figura 3.4, esses e alguns outros símbolos usados em heredogramas.

No caso da espécie humana, em que não se podem realizar experiências com cruzamentos dirigidos, a construção de heredogramas é particularmente importante para a determinação do padrão de herança das características, facilitando ao geneticista saber se um traço fenotípico é ou não hereditário e de que modo é herdado. Os heredogramas são também conhecidos como **genealogias**, ou **árvores genealógicas**. **(Fig. 3.4)**

3.2 Interação entre alelos de um mesmo gene

O conceito de dominância

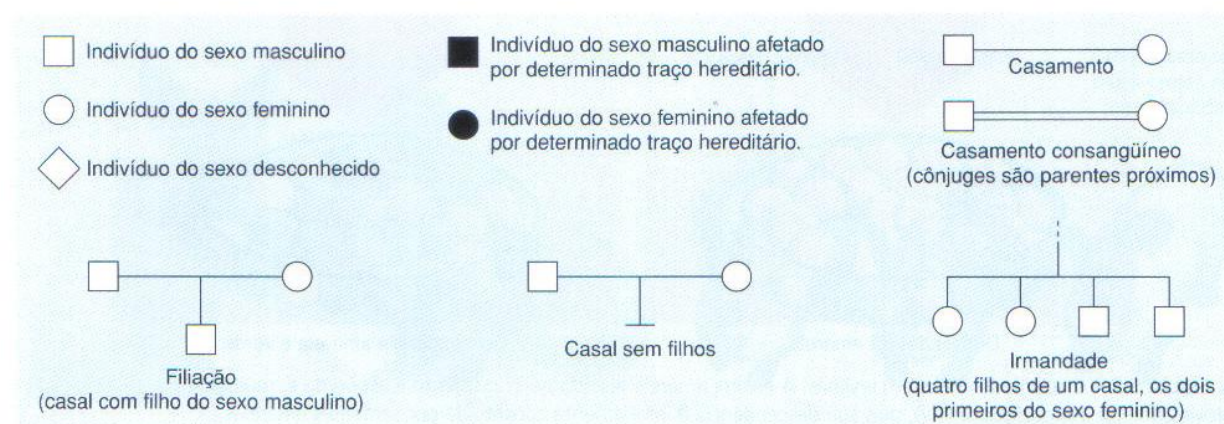
O termo dominante leva à idéia equivocada de que um alelo "domina" ou inibe a ação de outro. Não se conhece nenhum caso em que um alelo exerça ação, inibitória ou não, sobre seu par localizado no cromossomo homólogo. As relações entre os alelos de um gene são decorrentes do modo como os produtos gênicos, ou seja, as proteínas codificadas pelo gene, afetam o funcionamento celular. Na maioria dos casos, os alelos alterados (mutantes) recessivos têm sua seqüência de bases nitrogenadas alterada e não se expressam corretamente, de modo que a característica recessiva resulta geralmente da ausência do produto gênico.

Herança recessiva

Na espécie humana e em diversos outros organismos ocorre uma característica denominada **albinismo tipo I** (do latim *albus*, branco), em que há ausência completa de pigmentos na pele e em estruturas epidérmicas, como pêlos e penas, de modo que o indivíduo albino é branco. O albinismo decorre da incapacidade de as células epidérmicas produzirem melanina.

O alelo normal (***A***) do gene do albinismo produz uma enzima — a **tirosinase** — que catalisa a síntese de **melanina**, com produção desse pigmento na epiderme e em estruturas dela derivadas. O alelo recessivo (***a***) é alterado e não produz a forma ativa da enzima. Indivíduos homozigóticos ***AA*** e heterozigóticos ***Aa*** têm pigmentação normal, pois basta haver um alelo funcional ***A*** para produzir melanina normalmente. Por outro lado, um indivíduo homozigótico ***aa*** não produz melanina e sua pele e estruturas epidérmicas são despigmentadas. Esse tipo de albinismo, portanto, segue um padrão de herança recessiva. **(Fig. 3.5)**

Herança dominante

Em certos casos, um alelo alterado (mutante) apresenta um padrão de herança dominante em relação à versão normal do gene. Na espécie humana, por exemplo, a doença conhecida como **coréia de Huntington**, que afeta o sistema nervoso, segue um padrão de herança dominante: basta um alelo alterado para que o indivíduo apresente a doença.

▲ **Figura 3.4** • Simbologia utilizada na construção de heredogramas.

▲ **Figura 3.5** • **A.** Exemplos de albinismo tipo I em diversos organismos (cascavel, cervo, pavão e ser humano). **B.** Esquema que ilustra o papel dos alelos no albinismo. Os indivíduos heterozigóticos possuem uma versão correta do gene (*A*) e conseguem produzir pigmento, não sendo albinos. No entanto, eles podem gerar filhos homozigóticos, com as duas versões defeituosas do gene (*aa*), que não conseguem produzir melanina e são albinos.

Atualmente, sabe-se que o alelo normal do gene envolvido na coréia de Huntington produz uma proteína, a huntingtina, importante para o funcionamento normal das células cerebrais. O alelo mutante produz uma proteína alterada, que se acumula em certos neurônios, causando sua morte e os sintomas da doença. Indivíduos heterozigóticos ou homozigóticos para esse gene apresentam a doença, enquanto indivíduos homozigóticos recessivos são normais. Portanto, o alelo alterado comporta-se como dominante em relação ao alelo normal.

Dominância incompleta

Dominância incompleta é o termo utilizado pelos geneticistas para descrever situações em que o fenótipo dos indivíduos heterozigóticos é intermediário, em termos quantitativos, entre os fenótipos dos dois homozigóticos. Por exemplo, na planta boca-de-leão, indivíduos homozigóticos para um determinado gene apresentam flores vermelhas; os homozigóticos para a outra versão desse gene apresentam flores brancas; os indivíduos heterozigóticos têm flores cor-de-rosa.

Outro exemplo de dominância incompleta é a cor da plumagem em galinhas da raça andaluza. O cruzamento de aves de uma linhagem pura de plumagem preta com aves puras de plumagem branca produz descendentes de plumagem cinza-azulada. Quando indivíduos cinza-azulados são cruzados entre si, obtêm-se três tipos de descendentes, na seguinte proporção: 1 com plumagem preta : 2 com plumagem cinza-azulada : 1 com plumagem branca. Trata-se, portanto, de um caso de dominância incompleta, pois o genótipo heterozigótico exibe o fenótipo plumagem cinza-azulada, intermediário entre os fenótipos dos indivíduos homozigóticos de plumagens preta e branca, respectivamente.

Nesses casos, em que não há dominância de um alelo do gene em relação a outro, o gene costuma ser representado por uma letra maiúscula acompanhada de um índice que diferencia os alelos. Por exemplo, no caso da cor da flor da planta boca-de-leão, escolhemos a letra F para representar o gene responsável pela cor da flor, com índices sobrescritos para indicar os alelos responsáveis pela cor vermelha — F^V — e pela cor branca — F^B. Assim, os genótipos dos três tipos de plantas são representados por: F^VF^V (flores vermelhas), F^BF^B (flores brancas) e F^BF^V (flores cor-de-rosa).

No exemplo da cor da plumagem das galinhas andaluzas, poderíamos escolher a letra P para representar o gene, com índices para indicar os alelos responsáveis pela cor preta (P^P) e pela cor branca (P^B). De acordo com essa notação, os indivíduos com plumagem preta têm genótipo P^PP^P, os de plumagem branca têm genótipo P^BP^B e os de plumagem cinza-azulada têm genótipo P^PP^B. **(Fig. 3.6)**

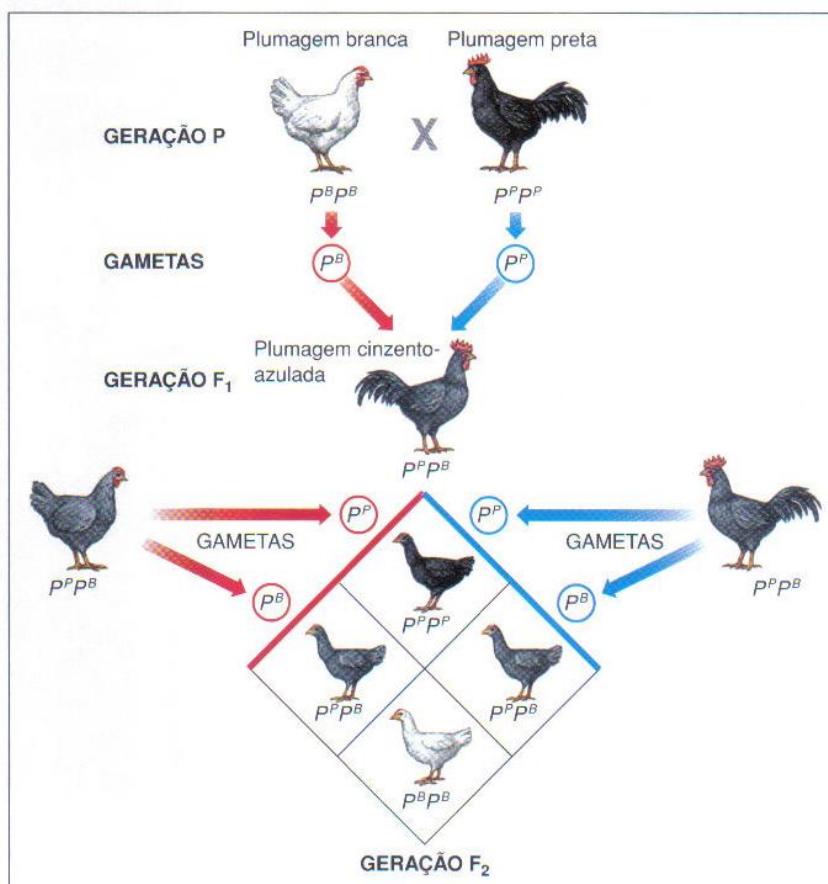
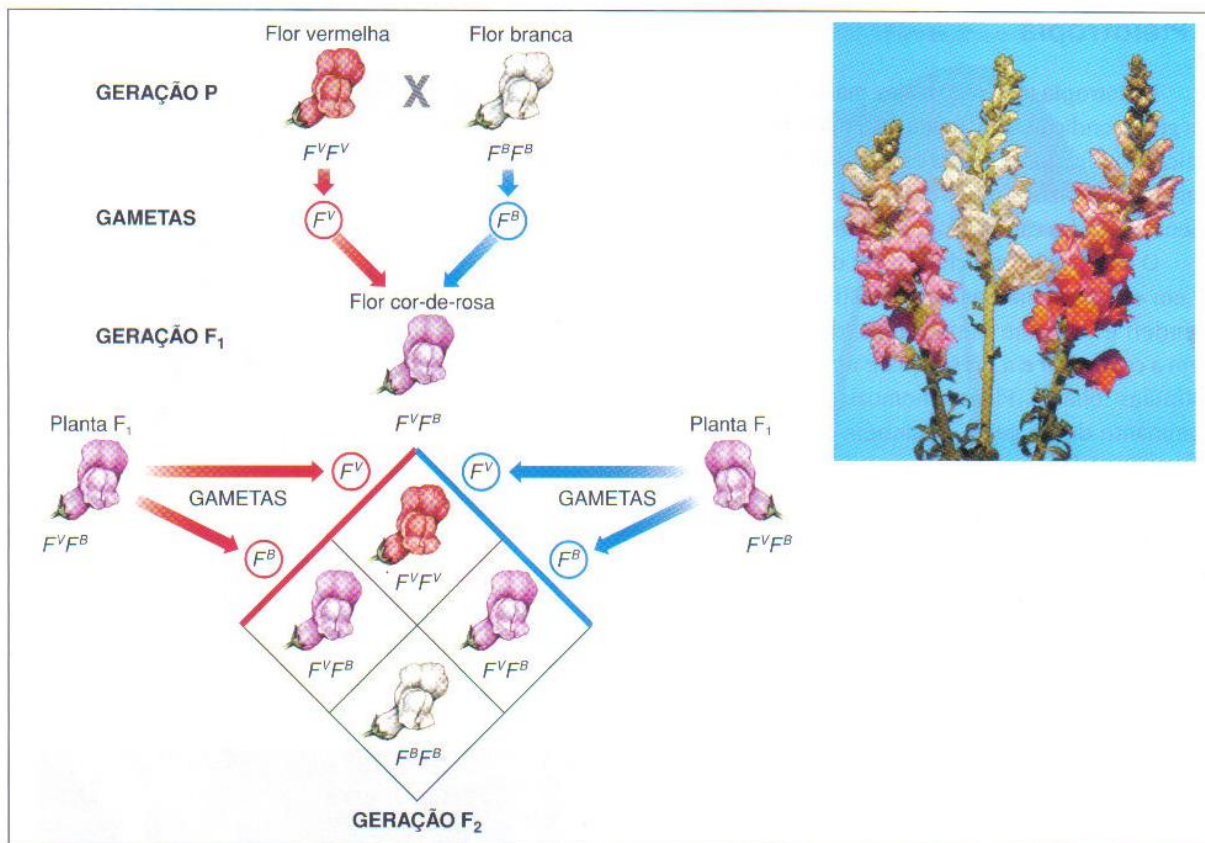
Como se explica a ação gênica, nos casos de dominância incompleta? Os estudos têm mostrado que, nesse tipo de herança, o fenótipo final do indivíduo depende da quantidade de determinado produto gênico que se forma nas células. Um indivíduo homozigótico, sendo portador de dois alelos funcionais, tem em suas células o dobro de produtos gênicos de um indivíduo heterozigótico, que possui apenas um alelo funcional. Na determinação genética da cor da flor de boca-de-leão, por exemplo, a presença de dois alelos funcionais nas células das pétalas gera pigmento em quantidade suficiente para que a flor seja vermelha. Nos indivíduos heterozigóticos, a quantidade de pigmento é cerca de metade daquela que se forma nos homozigóticos, o que faz a cor das pétalas ser mais clara, cor-de-rosa. Indivíduos homozigóticos com dois alelos que não determinam produção de pigmento têm flores brancas.

Co-dominância

Co-dominância é o fenômeno em que dois alelos diferentes de um gene se expressam no indivíduo heterozigótico; este apresenta, por isso, características presentes nos indivíduos homozigóticos para um alelo e para o outro.

Um exemplo de herança condicionada por alelos co-dominantes na espécie humana ocorre no sistema MN de grupos sangüíneos. Grupos sangüíneos são determinados por substâncias complexas (aglutinogênios) presentes na membrana das hemácias. O sistema MN compõe-se de três grupos sangüíneos, denominados **M**, **N** e **MN**, determinados por dois alelos de um gene, em geral, representados pelas siglas Ag^M e Ag^N. O alelo Ag^M determina a presença, na membrana das hemácias, de uma substância denominada **aglutinogênio M**, enquanto o alelo Ag^N determina a presença do **aglutinogênio N**. Pessoas homozigóticas Ag^MAg^M apresentam apenas o aglutinogênio M na membrana das hemácias e, por isso, pertencem ao grupo sangüíneo M. Pessoas homozigóticas Ag^NAg^N apresentam apenas o aglutinogênio N nas hemácias e, por isso, pertencem ao grupo sangüíneo N. Pessoas heterozigóticas Ag^MAg^N têm ambos os aglutinogênios nas hemácias, pertencendo ao grupo sangüíneo MN. No item 3.4 deste capítulo encontram-se mais informações sobre grupos sangüíneos humanos. **(Tab. 3.1)**

TABELA 3.1 • Relação de dominância entre alelos de um gene

Tipo de relação	Características
Dominância completa	Os indivíduos heterozigóticos apresentam o mesmo fenótipo que um dos homozigóticos.
Dominância incompleta	Os indivíduos heterozigóticos apresentam fenótipo intermediário entre os dos homozigóticos.
Co-dominância	Os indivíduos heterozigóticos apresentam ambos os fenótipos dos homozigóticos.

▲ **Figura 3.6** • Exemplos de dominância incompleta. Acima, representação do cruzamento entre plantas de boca-de-leão com flores vermelhas e com flores brancas. Abaixo, representação do cruzamento entre galinhas da raça andaluza.

Pleiotropia

Pleiotropia (do grego *pleios*, mais) é o fenômeno de um gene condicionar ou influenciar mais de uma característica no indivíduo. Embora esse seja um fenômeno bem comum, por razões didáticas costuma-se dar ênfase a apenas uma das características condicionada pelo gene.

O gene que condiciona a cor da casca da semente em ervilha (uma das características estudadas por Mendel) é um gene pleiotrópico, determinando também a cor da flor e a presença de uma mancha roxa nas estípulas foliares. Plantas homozigóticas para o alelo dominante desse gene, e também as heterozigóticas, apresentam flores púrpura, casca da semente cinza e mancha roxa nas estípulas. Plantas homozigóticas recessivas têm flores brancas, casca da semente branca e ausência de mancha nas estípulas. **(Fig. 3.7)**

Um exemplo de alelo pleiotrópico na espécie humana é o que causa a síndrome de Marfan. Pessoas portadoras do alelo dominante para a síndrome apresentam aracnodactilia, que se caracteriza pelos dedos anormalmente longos, finos e curvos, que lembram pernas de aranha, acompanhada de outras anomalias ósseas e defeitos nos olhos, no coração e nos pulmões.

▲ **Figura 3.7** • Em ervilha, um gene pleiotrópico condiciona, simultaneamente, três características: cor da flor, cor da semente e presença ou não de mancha roxa nas estípulas.

Alelos letais

Alelos que afetam a sobrevivência de seus portadores, causando a morte, são denominados alelos letais. Se bastar um deles para causar a morte do portador, fala-se em letal dominante; se forem necessários dois, fala-se em letal recessivo.

A acondroplasia é uma forma de nanismo humano condicionada por um alelo dominante ***D***, que prejudica o crescimento dos ossos durante o desenvolvimento. Pessoas com fenótipo acondroplásico são heterozigóticas ***Dd***, enquanto pessoas normais são homozigóticas recessivas (***dd***). O fato de nunca terem sido encontradas pessoas homozigóticas dominantes (***DD***) levou os cientistas a concluir que o alelo mutante, em homozigose, tem efeito tão severo que leva o portador à morte. Nesse caso, portanto, o alelo ***D*** comporta-se como um **alelo letal recessivo** na determinação da sobrevivência. **(Fig. 3.8)**

Outro exemplo de gene letal recessivo é o que afeta, simultaneamente, a cor da pelagem e a sobrevivência de camundongos. Um alelo mutante desse gene, conhecido como A^Y, determina pelagem amarela na condição heterozigótica com o alelo selvagem ***A*** (A^YA), mas mata seu portador na condição homozigótica (A^YA^Y). O alelo A^Y atua, portanto, na característica cor da pelagem e na característica sobrevivência. **(Fig. 3.9)**

▲ **Figura 3.8** • A acondroplasia na espécie humana é condicionada por um alelo dominante que em homozigose parece ser letal.

Macho amarelo

Fêmea amarela

GERAÇÃO P

A^YA

A^YA

Espermatozóides

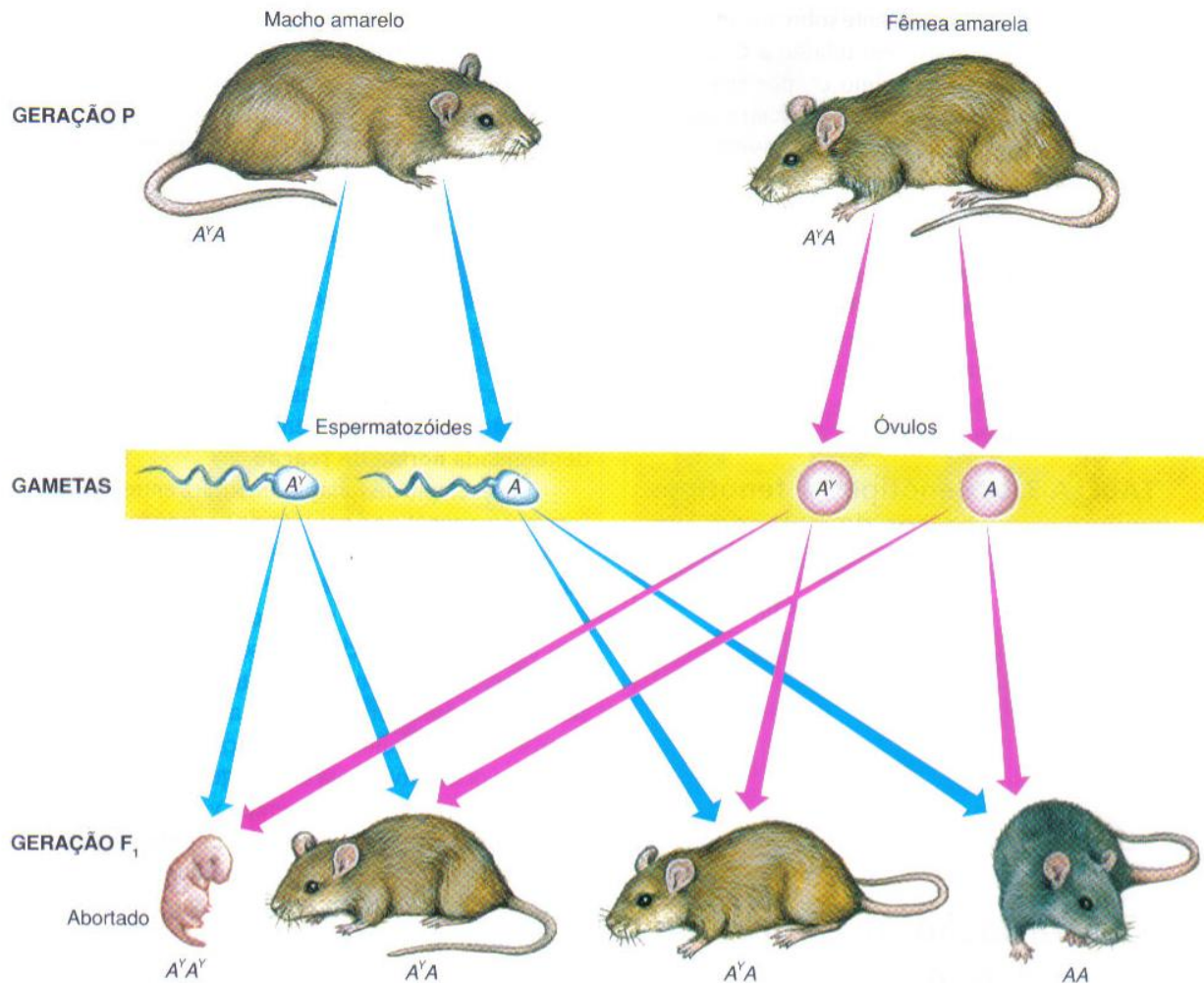
Óvulos

GAMETAS

A^Y A A^Y A

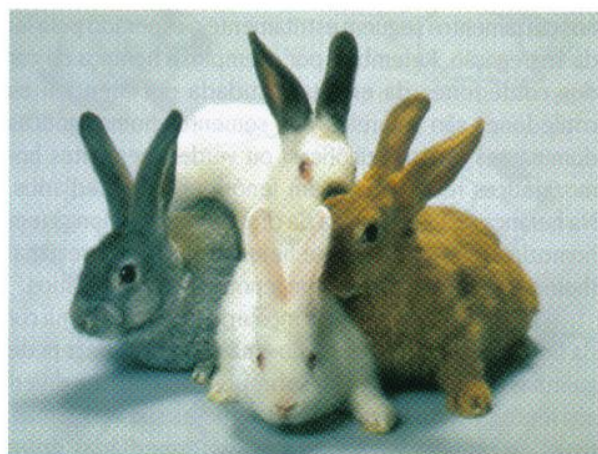
GERAÇÃO F_1

Abortado

A^YA^Y A^YA A^YA AA

▲ **Figura 3.9** • O alelo (A^Y), que condiciona pelagem amarela em camundongos, é letal em homozigose. Indivíduos homozigóticos para esse alelo (A^YA^Y) morrem no início do desenvolvimento embrionário. Assim, quando camundongos amarelos, que são sempre heterozigóticos, são cruzados entre si, a descendência é constituída por 2/3 de indivíduos amarelos (A^YA) e 1/3 de indivíduos cinzentos (AA).

Alelos múltiplos

Indivíduos diplóides sempre apresentam dois alelos de cada gene, um proveniente do pai e outro, da mãe. Entretanto, muitos genes ocorrem em mais de duas formas alélicas, isto é, pode haver três ou mais alelos diferentes na população. Fala-se, nesse caso, em **alelos múltiplos**.

Um exemplo bem conhecido de alelos múltiplos é relativo a um gene envolvido na determinação da cor da pelagem de coelhos. Esse gene apresenta-se sob quatro formas alélicas (alelos): $\boldsymbol{C}$, que determina pelagem castanho-acinzentada (selvagem ou aguti); $\boldsymbol{c^{ch}}$, que determina pelagem cinzento-prateada (chinchila); $\boldsymbol{c^{h}}$, que determina pelagem branca com extremidades escuras (himalaia); $\boldsymbol{c}$, que condiciona pelagem branca (albina). **(Fig. 3.10)**

▲ **Figura 3.10** • Quatro tipos de pelagem em coelhos: chinchila, à esquerda; himalaia, atrás; aguti, à direita; albino, na frente.

O alelo C atua como dominante sobre os outros três. O alelo c^{ch}, embora recessivo em relação a C, é dominante sobre c^h e sobre c. O alelo c^h, por sua vez, é recessivo em relação a C e a c^{ch} e dominante sobre c. Este, finalmente, é recessivo em relação aos outros três alelos. A relação de dominância entre os quatro alelos pode ser representada por: $C > c^{ch} > c^h > c$.

Como os alelos ocorrem aos pares nos indivíduos, há dez tipos possíveis de genótipos em coelhos quanto a esse gene, e quatro tipos de fenótipos. **(Tab. 3.2) (Fig. 3.11)**

Veremos adiante, no item que trata da herança de grupos sangüíneos humanos, um caso de alelos múltiplos em nossa espécie, referente ao gene que determina os grupos sangüíneos do sistema ABO.

TABELA 3.2 • Genótipos e fenótipos na cor da pelagem em coelhos

Genótipos	Fenótipos
CC, Cc^{ch}, Cc^h e Cc	Selvagem
$c^{ch}c^{ch}$, $c^{ch}c^h$ e $c^{ch}c$	Chinchila
c^hc^h e c^hc	Himalaia
cc	Albino

3.3 Variação na expressão dos genes

Variação descontínua

Nos exemplos de herança que vimos até agora, os fenótipos produzidos pelos diferentes genótipos são bem distintos, de modo que as proporções fenotípicas obtidas nos cruzamentos seguem estritamente o esperado pela lei da segregação. Relembre, por exemplo, a herança da cor dos cotilédones da ervilha estudada por Mendel; os cotilédones são amarelos (em sementes homozigóticas dominantes e heterozigóticas) ou verdes (sementes homozigóticas recessivas), sem fenótipos intermediários. Na herança da forma da asa da drosófila, a asa é longa (em homozigóticos dominantes e heterozigóticos) ou vestigial (homozigótico recessivo), sem fenótipos intermediários.

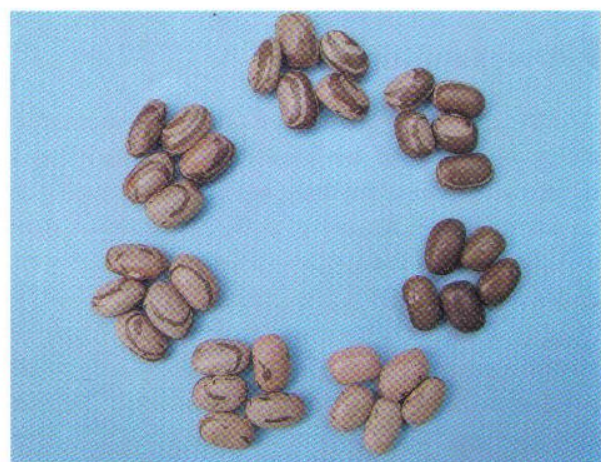
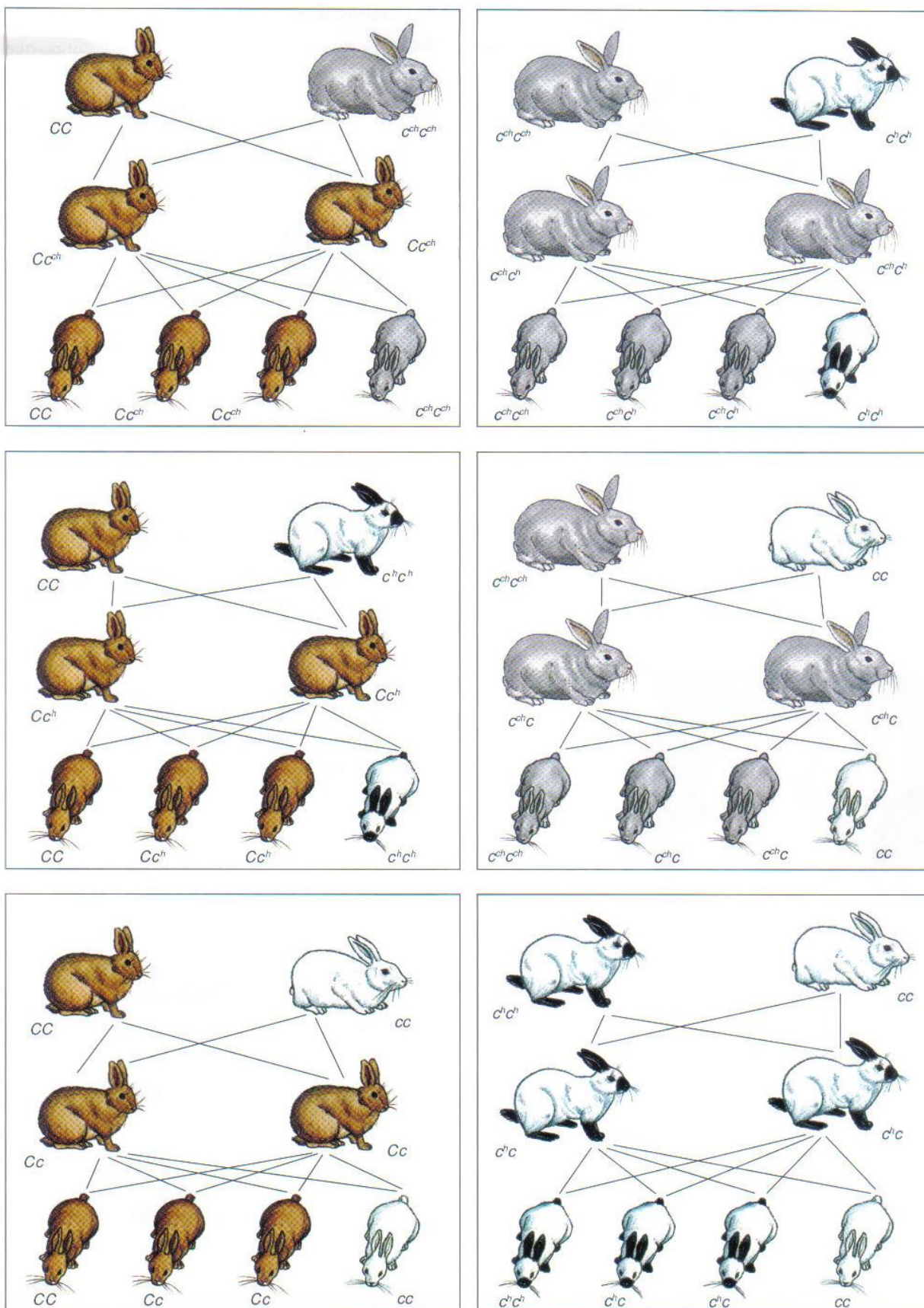
Mesmo na dominância incompleta, estudada na cor da flor da planta boca-de-leão e na cor da plumagem de galinhas andaluzas, não há sobreposição entre os diversos fenótipos. Na boca-de-leão, as flores são vermelhas, rosas ou brancas, sem gradações intermediárias entre esses tipos. No caso das galinhas andaluzas, a plumagem é preta, cinza-azulada ou branca, sem gradações entre essas três cores.

Quando os diversos genótipos correspondem a fenótipos alternativos bem distintos, fala-se em **variação descontínua**.

Norma de reação dos genes

Apesar de muito utilizados para exemplificar a herança genética, os casos de variação descontínua são relativamente pouco freqüentes na natureza; apenas uma proporção pequena de genes apresenta esse tipo de comportamento. O mais comum é que um mesmo genótipo produza uma gama variada de fenótipos, dentro de certos limites. A gama de variação fenotípica que um genótipo pode expressar é denominada **norma de reação**.

Um exemplo de variação fenotípica entre indivíduos com mesmo genótipo é encontrado na variedade de feijão conhecida como carioca. Essa variedade é homozigótica quanto ao alelo dominante L de um gene que condiciona a presença de coloração variegada na casca da semente, com listras irregulares claras e escuras. O alelo recessivo desse gene, l, condiciona semente totalmente pigmentada, sem variegação, e está presente na variedade conhecida como feijão-mulatinho (homozigótica ll).

Se você obtiver uma embalagem de feijão-carioca no comércio e analisar as sementes, verificará que a grande maioria dos grãos é variegada. Entretanto, cerca de 5% dos grãos são totalmente pigmentados, assemelhando-se ao feijão-mulatinho. Assim, apesar de toda semente de feijão-carioca ser homozigótica LL, com dois alelos condicionantes da presença de coloração variegada, cerca de 5% delas não exibem o fenótipo correspondente, isto é, têm coloração homogênea. A explicação é que o alelo L apresenta uma norma de reação tão ampla que alguns dos indivíduos portadores desse alelo não exibem o fenótipo correspondente. **(Fig. 3.12)**

▲ **Figura 3.12 •** Norma de reação do gene que condiciona a presença de listras marrons na semente de feijão-carioca. Sementes com o mesmo genótipo (LL) podem apresentar diferentes fenótipos, inclusive ausência de listras.

▲ **Figura 3.11** • Esquemas de cruzamentos entre coelhos com diferentes tipos de pelagem.

Penetrância gênica

O feijão-carioca ilustra o conceito da **penetrância gênica**, definida como a porcentagem de indivíduos com determinado genótipo que expressa o fenótipo correspondente. Como vimos anteriormente, a penetrância do alelo ***L*** do feijão-carioca é de 95%, pois é essa a porcentagem dos indivíduos portadores desse alelo que exibe o fenótipo correspondente — coloração variegada da casca. Lembre-se de que 5% dos grãos com genótipo ***LL*** não apresentam variegação, comportando-se como se tivessem genótipo ***ll***. Nos casos de variação descontínua, como os estudados por Mendel, a penetrância dos alelos é de 100%, pois todos os indivíduos apresentam o fenótipo correspondente a seu genótipo. Acompanhe, na tabela 3.3, os resultados de um cruzamento entre feijão-carioca e feijão-mulatinho. **(Tab. 3.3)**

Na espécie humana, o traço conhecido como **polidactilia postaxial** (do grego *polys*, muitos, e *daktylos*, dedos), caracterizado pela presença de um dedo extranumerário próximo ao quinto dedo da mão ou do pé, é condicionado por um alelo dominante com penetrância incompleta. Um estudo populacional realizado na África estimou que a penetrância desse alelo é de 64,9%, ou seja, 35,1% (100 − 64,9) dos portadores do alelo dominante não apresentam o traço, possuindo número normal de dedos. **(Fig. 3.13)**

◀ **Figura 3.13** • Foto de mão de pessoa com polidactilia.

Expressividade gênica

A manifestação de um gene, isto é, o fenótipo que ele expressa, pode ser definida como sua expressividade. Em muitos casos, o mesmo tipo de alelo expressa-se de maneira diferente em seus portadores; fala-se, nesse caso, em **expressividade gênica variável**. No feijão-carioca, por exemplo, os portadores do alelo ***L*** que possuem fenótipo variegado (95% das sementes) apresentam padrão e quantidade de faixas diferentes, mostrando que o alelo ***L*** tem expressividade variável.

Outro exemplo de alelo com expressividade gênica variável é o que condiciona a presença de manchas na pelagem de mamíferos. Trata-se de um alelo recessivo ***s*** que, em homozigose (***ss***), produz pelagem variegada, com áreas sem pigmento intercaladas com áreas de pelagem pigmentada. O alelo dominante desse gene condiciona o padrão pelagem homogênea, sem manchas. Um estudo realizado com cães da raça *beagle* mostrou que esse alelo tem expressividade variável, com cerca de 10 diferentes padrões de pelagem. **(Fig. 3.14)**

Nos *beagles*, assim como nos demais mamíferos, a presença do alelo dominante ***S*** determina distribuição homogênea dos melanócitos (células produtoras de melanina) na epiderme, condicionando fenótipo não-variegado. O alelo recessivo **s** interfere na distribuição dos melanócitos durante a embriogênese, resultando em pelagem com manchas (fenótipo variegado). Animais com genótipos ***SS*** ou ***Ss*** têm pelagem com coloração homogênea, enquanto animais com genótipo ***ss*** têm pelagem variegada, com áreas pigmentadas e áreas sem pigmento. A quantidade e o tamanho das manchas variam entre os indivíduos com genótipo ***ss***, desde uma pelagem quase homogeneamente pigmentada até um extremo de despigmentação, com poucas manchas pigmentadas. Portanto, o alelo ***s*** apresenta expressividade variável.

TABELA 3.3 • Proporções genotípicas e fenotípicas no cruzamento entre as variedades de feijão carioca e mulatinho.

Geração P	Carioca	X	Mulatinho
genótipos	*LL*		*ll*
fenótipos	com listras		sem listras
Geração F_1			
genótipo		*Ll*	
fenótipo		95% com listras e 5% sem listras*	
Geração F_2			
genótipos	25% *LL*	50% *Ll*	25% *ll*
fenótipos	23,75% com listras + 1,25% sem listras*	47,50% com listras + 2,50% sem listras*	25% sem listras

* porcentagem de sementes portadoras do alelo *L* que não expressam o fenótipo listrado.

Fonte: M. Ramalho, J. B. Santos e C. B. Pinto. *Genética na agropecuária*. São Paulo: Globo, 1989.

▲ **Figura 3.14** • **A.** O padrão malhado de pelagem de mamíferos é condicionado por um alelo recessivo de um gene com expressividade variável. **B.** Em cães da raça *beagle* podem-se distinguir 10 padrões de pelagem devidos à expressividade variável do alelo que condiciona a variegação da pelagem.

3.4 Herança de grupos sangüíneos na espécie humana

Sistema ABO de grupos sangüíneos

Descoberta dos grupos sangüíneos A, B, AB e O

No início do século XX, o médico austríaco naturalizado norte-americano, Karl Landsteiner (1868-1943), verificou a existência de uma incompatibilidade sangüínea entre certas pessoas. Ele descobriu que, quando amostras de sangue de diferentes pessoas eram misturadas, em certos casos as hemácias se aglutinavam, isto é, juntavam-se formando aglomerados. Em 1902, Landsteiner e seus colaboradores conseguiram classificar o sangue humano em 4 tipos, denominados **A**, **B**, **AB** e **O** (este último foi originalmente denominado grupo zero, mas o termo "ó" está consagrado pelo uso).

Landsteiner concluiu que a incompatibilidade entre os grupos sangüíneos deve-se a uma reação imunológica entre substâncias dissolvidas no plasma sangüíneo e substâncias presentes na membrana das hemácias. Ele chamou as substâncias aglutinadoras do plasma de **aglutininas**, e as substâncias aglutinógenas da membra-

na das hemácias de **aglutinogênios**. Hoje, sabe-se que as aglutininas são anticorpos capazes de reagir com certos polissacarídios da membrana plasmática das hemácias, os aglutinogênios. O sistema ABO compreende dois tipos de aglutinogênios (A e B) e dois tipos de aglutininas (anti-A e anti-B), com a distribuição mostrada a seguir. **(Tab. 3.4)**

TABELA 3.4 • Aglutinogênios e aglutininas do sistema ABO

Grupo sangüíneo	Aglutinogênios (nas hemácias)	Aglutininas (no plasma)
A	A	anti-B
B	B	anti-A
AB	AB	—
O	—	anti-A e anti-B

A descoberta dos grupos sangüíneos teve grande importância médica, pois permitiu realizar transfusões de sangue apenas entre pessoas de grupos sangüíneos compatíveis. Se uma pessoa receber sangue de um tipo incompatível com o seu, as hemácias do sangue recebido podem aglutinar-se e formar aglomerados, que entopem os capilares sangüíneos, prejudicando a circulação e, dependendo do caso, causando a morte. Em 1930, Landsteiner recebeu o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina por seus trabalhos sobre grupos sangüíneos da espécie humana.

Tipos possíveis de transfusão sangüínea no sistema ABO

Uma pessoa portadora de determinada aglutinina não pode receber sangue cujas hemácias tenham aglutinogênio correspondente. Pessoas do grupo sangüíneo A, que têm aglutinina anti-B no plasma, não podem receber sangue do tipo B nem do tipo AB, pois estes contêm, em suas hemácias, aglutinogênio B. Da mesma forma, pessoas do grupo sangüíneo B, que têm aglutinina anti-A no plasma, não podem receber sangue do tipo A nem do tipo AB, pois ambos contêm, em suas hemácias, o aglutinogênio A.

Pessoas do grupo sangüíneo AB, que não têm aglutininas no plasma, podem receber qualquer tipo de sangue (A, B, AB ou O), sendo por isso chamadas de **receptores universais**. Por outro lado, pessoas do grupo sangüíneo O, que têm os dois tipos de aglutinina no plasma, só podem receber sangue de seu próprio grupo. Entretanto, como os portadores de sangue O não apresentam nenhum dos dois aglutinogênios (A ou B) em suas hemácias, eles podem doar sangue a qualquer pessoa, sendo por isso chamados de **doadores universais**. **(Tab. 3.5)**

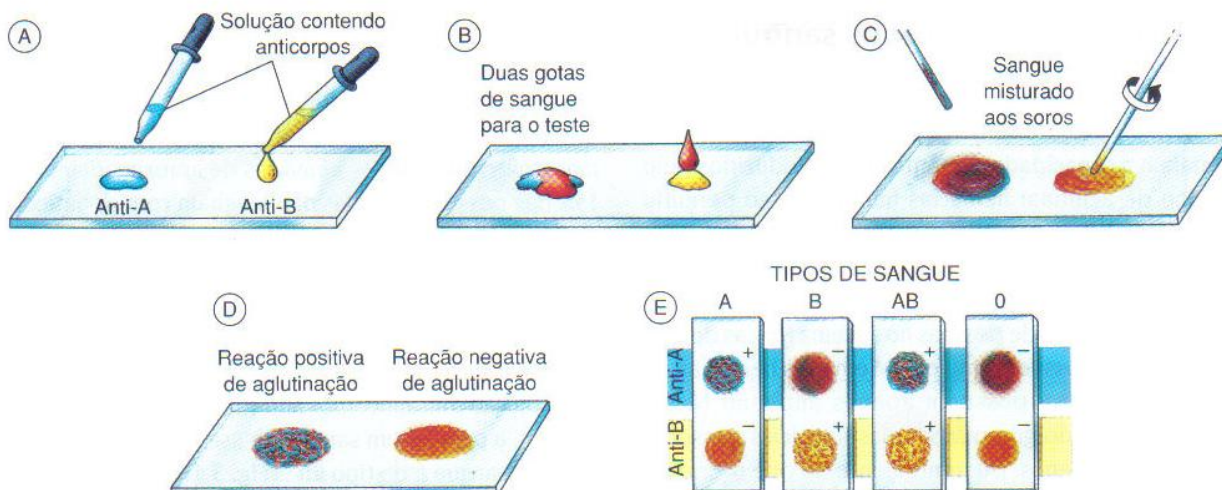
TABELA 3.5 • Tipos possíveis de transfusão sangüínea no sistema ABO

Grupo sangüíneo da pessoa	Recebe de	Doa para
A	A e O	A e AB
B	B e O	B e AB
AB	A, B, AB e O	AB
O	O	A, B, AB e O

É importante considerar que as hemácias do sangue doado entram imediatamente em contato com o plasma sangüíneo do receptor. Se nesse plasma houver aglutininas correspondentes aos aglutinogênios das hemácias que entram, estas serão imediatamente aglutinadas. Por exemplo, se hemácias de um sangue A, portadoras de aglutinogênio A, forem doadas a uma pessoa de sangue B, serão imediatamente aglutinadas pela aglutinina anti-B do receptor.

Uma pergunta que normalmente se faz é se o plasma do sangue doado também tem efeito relevante na transfusão. Se levamos em conta que a quantidade de sangue doada é relativamente menor que a do sangue da pessoa que o recebe, a resposta é não. Isso porque as aglutininas do plasma doador diluem-se no plasma do receptor, causando pouca ou nenhuma aglutinação de suas hemácias. Assim, na prática, o que é mais importante considerar na transfusão são as aglutininas do plasma do receptor e os aglutinogênios das hemácias do doador.

Apesar dessas considerações sobre as transfusões possíveis, nos bancos de sangue dá-se preferência, exceto em situações de emergência, a transfusões entre pessoas com o mesmo tipo sangüíneo.

Para determinar os grupos sangüíneos do sistema ABO, misturam-se duas gotas do sangue da pessoa com duas soluções diferentes, uma delas contendo aglutinina anti-A e a outra, aglutinina anti-B. Se ocorre aglutinação do sangue apenas na gota com a solução anti-A, a pessoa é do grupo A; se ocorre aglutinação do sangue apenas na gota com a solução anti-B, ela é do grupo B; se ocorre aglutinação do sangue em ambas as gotas, a pessoa pertence ao grupo AB; se não há aglutinação do sangue em nenhuma das gotas, a pessoa pertence ao grupo O. **(Fig. 3.15)**

▲ **Figura 3.15** • Representação dos passos da técnica empregada na determinação do grupo sangüíneo do sistema ABO.

Genética do sistema ABO de grupos sangüíneos

Os quatro fenótipos do sistema sangüíneo ABO — A, B, AB e O — são determinados por um gene com alelos múltiplos. Os três alelos desse gene são denominados I^A, I^B e i. O alelo I^A determina a presença do aglutinogênio A na membrana das hemácias, o alelo I^B determina a presença do aglutinogênio B e o alelo i não determina presença de nenhum desses dois aglutinogênios. Pessoas com genótipos I^AI^A ou I^Ai têm apenas aglutinogênio A nas hemácias e, portanto, sangue do tipo A; pessoas com genótipos I^BI^B ou I^Bi têm apenas aglutinogênio B nas hemácias e, portanto, sangue do tipo B; pessoas com genótipo I^AI^B têm os aglutinogênios A e B nas hemácias e seu sangue é do tipo AB; pessoas com genótipo ii não têm nenhum dos dois aglutinogênios nas hemácias e seu sangue é do tipo O. Os alelos I^A e I^B são co-dominantes, pois ambos se expressam na condição heterozigótica, produzindo, respectivamente, os aglutinogênios A e B. O alelo **i** é recessivo em relação aos outros dois; as relações de dominância entre esses três alelos costumam ser expressas da seguinte maneira: $I^A = I^B > i$. **(Tab. 3.6)**

TABELA 3.6 • Relação entre genótipos e fenótipos no sistema ABO

Fenótipos	Genótipos
Grupo A	I^AI^A ou I^Ai
Grupo B	I^BI^B ou I^Bi
Grupo AB	I^AI^B
Grupo O	ii

Hoje sabemos como esses três alelos produzem os diferentes fenótipos do sistema ABO. O alelo I^A codifica uma enzima que transforma uma substância precursora H no aglutinogênio A; o alelo I^B codifica uma enzima ligeiramente diferente, que transforma a mesma substância precursora H no aglutinogênio B; o alelo i é inativo e não consegue transformar o precursor H em nenhum componente da membrana das hemácias.

A síntese do precursor H depende de um outro gene, que possui um alelo recessivo raro h não funcional. As raríssimas pessoas homozigóticas hh não produzem o precursor H e, na ausência deste, não há produção de nenhum dos aglutinogênios, mesmo que a pessoa seja portadora dos alelos I^A ou I^B. Por não possuírem nenhum dos dois aglutinogênios em suas hemácias, as pessoas com genótipo hh são erroneamente classificadas como pertencentes ao grupo O, mas, geneticamente, elas não pertencem a esse grupo. Essa situação, em que a pessoa aparenta ser do grupo O pelo fato de não produzir o precursor H, é conhecida como **fenótipo Bombaim**, por ter sido descrita originalmente nessa cidade da Índia.

Origem dos anticorpos do sistema ABO

A aglutinina anti-A ocorre naturalmente no sangue de pessoas que não possuem o antígeno correspondente (aglutinogênio A) em suas hemácias. Da mesma forma, a aglutinina anti-B ocorre naturalmente no sangue de pessoas que não possuem o aglutinogênio B em suas hemácias. Os cientistas acreditam que esses anticorpos (aglutinina anti-A e aglutinina anti-B) são produzidos em resposta a substâncias antigênicas semelhantes a eles, presentes em bactérias e outros microrganismos que invadem o trato digestório logo após o nascimento.

Sistema MN de grupos sangüíneos

Em 1927, Landsteiner e um de seus colaboradores injetaram sangue de diferentes pessoas em coelhos e testaram a capacidade dos anticorpos produzidos pelo coelho de aglutinar hemácias humanas. Isso permitiu identificar outro sistema de grupo sangüíneo, caracterizado por dois tipos de aglutinogênios nas hemácias, o **antígeno M** e o **antígeno N**.

Há três tipos de pessoas no sistema MN: as do grupo M, que só possuem antígeno M em suas hemácias, as do grupo N, que possuem apenas antígeno N nas hemácias e as do grupo MN, cujas hemácias possuem ambos os antígenos. Diferentemente do que ocorre no sistema ABO, as pessoas não possuem aglutininas contra os antígenos M e N naturalmente em seu plasma sangüíneo, de modo que não há restrições a transfusões no que se refere a esse sistema de grupos sangüíneos.

Os grupos sangüíneos do sistema MN são determinados por dois tipos de alelo de um gene; um deles, chamado de Ag^M, condiciona a presença do antígeno M na membrana das hemácias e o outro, chamado de Ag^N, condiciona a presença do antígeno N. Pessoas homozigóticas Ag^MAg^M pertencem ao grupo M, as homozigóticas Ag^NAg^N pertencem ao grupo N e as heterozigóticas Ag^MAg^N pertencem ao grupo MN. Como já mencionamos, os alelos Ag^MAg^N são co-dominantes. **(Tab. 3.7)**

TABELA 3.7 • Relação entre genótipos e fenótipos no sistema MN

Genótipos	Fenótipos (antígeno nas hemácias)	Grupos sangüíneos
Ag^MAg^M	Antígeno M	M
Ag^NAg^N	Antígeno N	N
Ag^MAg^N	Antígenos M e N	MN

Sistema Rh de grupos sangüíneos

Descoberta do sistema Rh

Na década de 1940, Landsteiner e seu grupo descobriram um novo sistema de grupos sangüíneos na espécie humana, chamando-o de **sistema Rh**. Eles injetaram hemácias de um pequeno macaco, conhecido como reso (*Macaca rhesus*, atualmente classificada como *Macaca mullata*), em coelhos e obtiveram um anticorpo que foi denominado **anti-Rh** (abreviatura de "anti-rhesus"). Ao ser testado em sangue humano, verificou-se que esse anticorpo provocava aglutinação das hemácias em cerca de 85% das pessoas. Essas pessoas, cujas hemácias foram aglutinadas pelos anticorpos anti-Rh, foram denominadas **Rh positivas** (Rh^+), para indicar que suas hemácias têm um antígeno semelhante ao dos macacos, o **fator Rh**. As hemácias de aproximadamente 15% das pessoas testadas não reagiram com os anticorpos anti-Rh, e por isso estas foram denominadas **Rh negativas** (Rh^-), para indicar a ausência do fator Rh em suas hemácias.

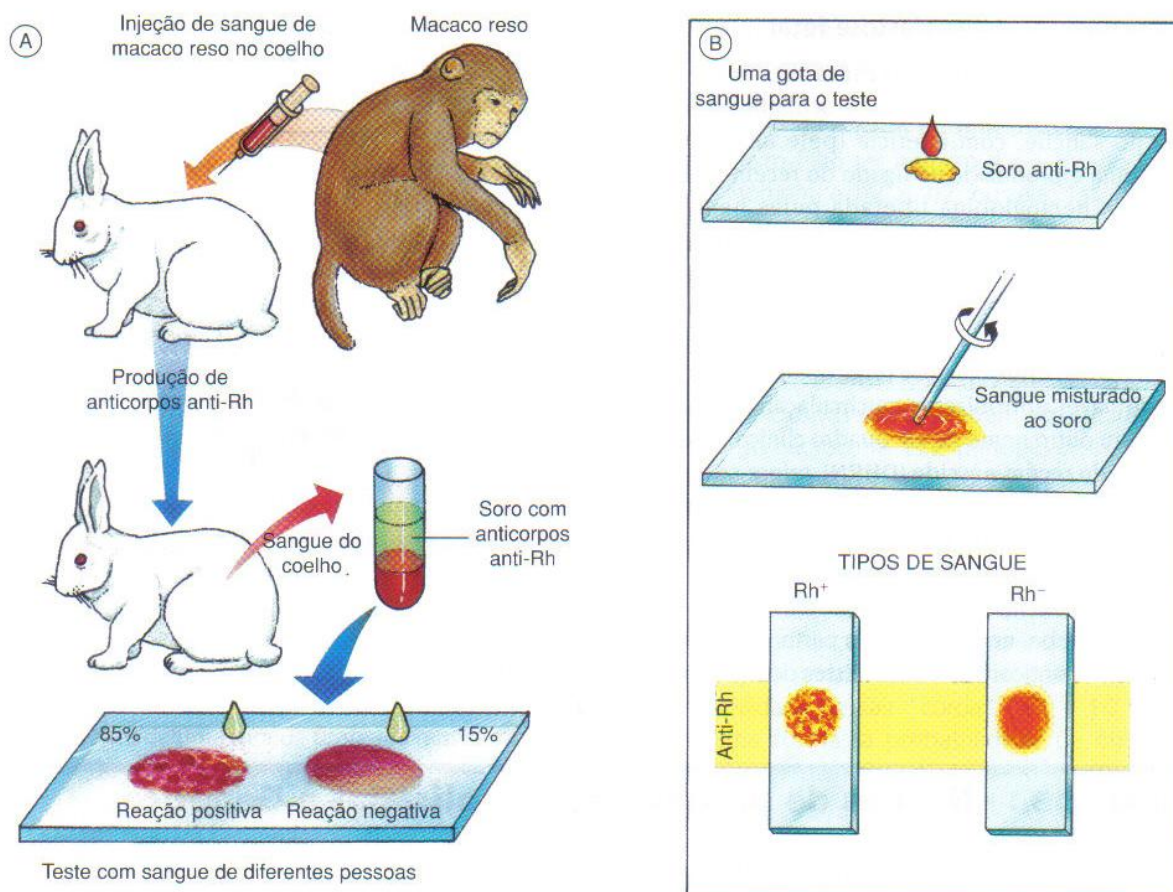
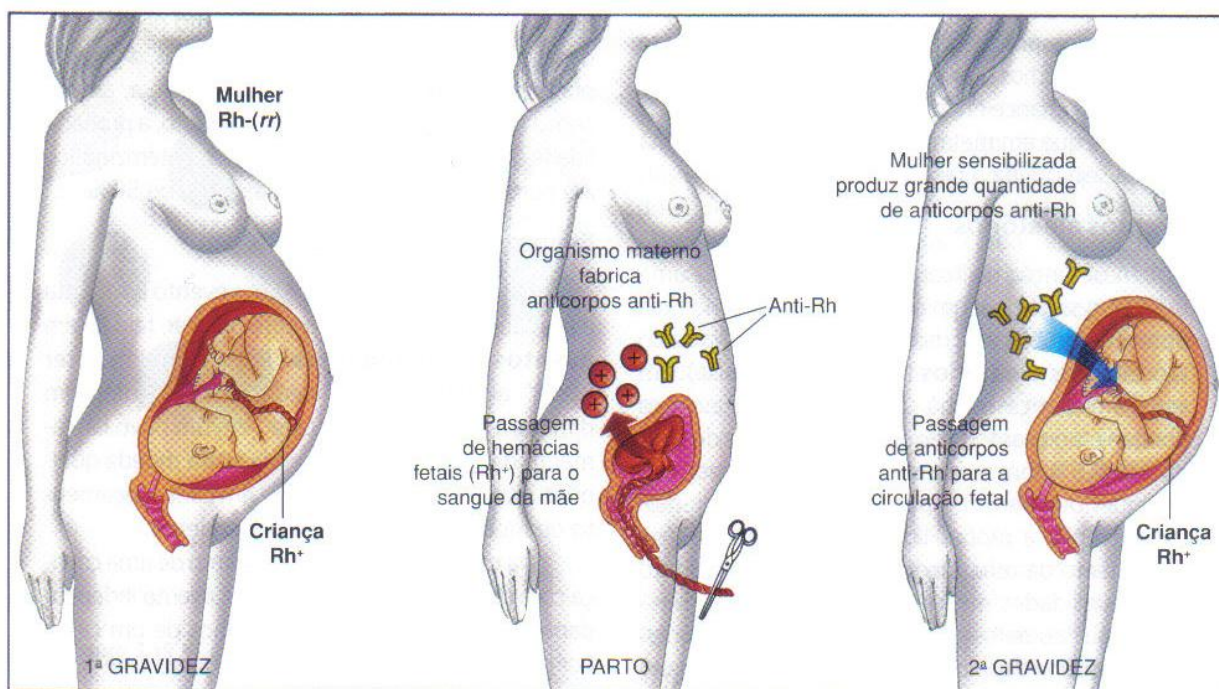
Para testar os grupos sangüíneos no sistema Rh, mistura-se uma gota do sangue da pessoa em exame a uma solução com anticorpos anti-Rh; se as hemácias aglutinarem, a pessoa tem sangue Rh^+; se não houver aglutinação, o sangue é do tipo Rh^-. **(Fig. 3.16)**

Determinação genética dos tipos sangüíneos do sistema Rh

Os grupos sangüíneos do sistema Rh são condicionados por dois alelos (***R*** e ***r***) com dominância completa. Pessoas portadoras de pelo menos um alelo dominante, com genótipos ***RR*** ou ***Rr***, apresentam o fator Rh em suas hemácias e têm, portanto, fenótipo Rh^+; pessoas homozigóticas recessivas (***rr***) não têm fator Rh e apresentam fenótipo Rh^-.

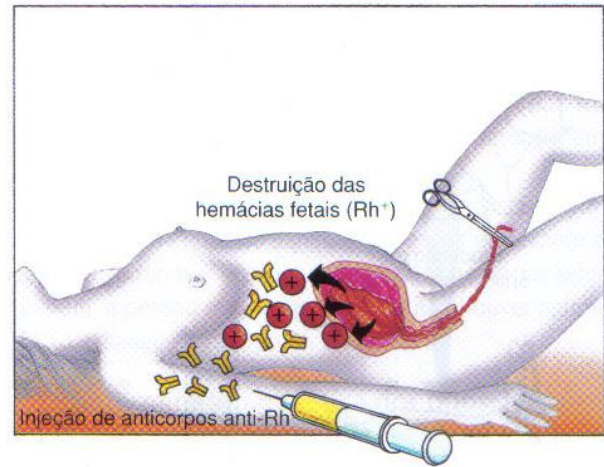
Fator Rh e eritroblastose fetal

Os anticorpos anti-Rh e os do sistema MN não existem naturalmente no sangue das pessoas, como ocorre com os anticorpos anti-A e anti-B. Uma pessoa Rh^- só produzirá anticorpos anti-Rh se for **sensibilizada**, isto é, se receber, em sua circulação sangüínea, hemácias portadoras do fator Rh (Rh^+); pessoas Rh^+ não produzem anticorpos anti-Rh.

A sensibilização de uma pessoa Rh^- ocorre quando ela recebe transfusão de sangue Rh^+ ou quando mulheres Rh^- geram um filho Rh^+. Neste último caso, durante a gravidez e, principalmente, na hora do parto, ocorrem rupturas na placenta e passagem de hemácias da criança (Rh^+) para a circulação materna. As hemácias de um feto Rh^+ estimulam a mãe Rh^- a produzir anticorpos e a adquirir memória imunitária, tornando-se sensibilizada para o fator Rh. No transcorrer da primeira gravidez, o nível de sensibilização é pequeno e a quantidade de anticorpos presentes no sangue da mãe não chega a afetar a criança. Na hora do parto, porém, pode ocorrer forte sensibilização da mãe, o que terá conseqüências para gestações posteriores. Se uma próxima criança gerada for Rh^+, anticorpos anti-Rh serão rapidamente produzidos pelas células de memória imunitária da mãe sensibilizada. Eles atravessam a placenta e destroem as hemácias fetais, processo que continua no recém-nascido. **(Fig. 3.17)**

▲ **Figura 3.16** • Representação da técnica que levou à descoberta do fator Rh (**A**) e do método de determinação dos grupos sangüíneos do sistema Rh (**B**).

▲ **Figura 3.17** • Representação do processo da sensibilização de uma mulher Rh− por um feto Rh+.

Sintomas da eritroblastose fetal

A destruição das hemácias causa forte anemia no recém-nascido; além disso, ocorre acúmulo de bilirrubina no sangue, com icterícia (pele amarelada). A bilirrubina é produzida no fígado do recém-nascido a partir da hemoglobina liberada pelas hemácias destruídas pelos anticorpos anti-Rh. Para compensar a destruição das hemácias, ocorre liberação de eritroblastos (hemácias imaturas) na circulação do recém-nascido. Esse conjunto de sintomas caracteriza a doença conhecida como **eritroblastose fetal**, nome que ressalta o fato de haver eritroblastos na circulação da criança doente. Um outro nome desse quadro clínico, **doença hemolítica do recém-nascido (DHRN)**, refere-se ao fato de ocorrer destruição de hemácias pelos anticorpos anti-Rh. O termo "hemólise" vem do grego *haimos*, sangue, e *lise*, destruição.

Atualmente, uma mulher Rh^- que vai dar à luz uma criança Rh^+ recebe, no momento do parto, uma injeção intravenosa de anticorpos anti-Rh. Estes destroem rapidamente as hemácias fetais Rh^+ que penetram na circulação materna durante o parto, evitando que elas causem sensibilização na mulher. **(Fig. 3.18)**

▲ **Figura 3.18** • Representação do tratamento pós-parto para evitar a sensibilização de uma mulher Rh^- que deu à luz um primeiro filho Rh^+.

QUADRO 3.1 • Noções de probabilidade aplicadas à Genética

Princípios básicos de probabilidade

Probabilidade é a chance de um determinado evento ocorrer, entre dois ou mais eventos possíveis. Por exemplo, a chance de uma moeda cair com a face "cara" voltada para cima representa um entre dois eventos possíveis, "cara" ou "coroa". Nesse exemplo, dizemos que a probabilidade de sair "cara" é 1/2 (uma chance em duas possíveis) ou 50%, pois espera-se que em metade dos lançamentos de uma moeda seja obtida a face "cara".

Eventos aleatórios

A obtenção de "cara" no lançamento de uma moeda, o sorteio de um ás de ouro do baralho ou a obtenção de "face 6" no lançamento de um dado são **eventos aleatórios** (do latim *alea*, sorte). Em cada um dos casos, há um conjunto de eventos possíveis, e o evento selecionado ("cara", ás de ouro ou "face 6") tem a mesma chance de ocorrer que qualquer outro evento possível naquele conjunto. Por exemplo, a probabilidade de obter "cara" no lançamento de uma moeda é 1/2, pois o conjunto de possibilidades é composto de dois eventos — "cara" ou "coroa" — com a mesma chance de ocorrer. A probabilidade de sortear o ás de ouro em um baralho é 1/52, pois o conjunto de possibilidades é formado por 52 cartas, cada uma com igual chance de ser sorteada. A probabilidade de obter "face 6" ao lançar um dado é 1/6, que corresponde a 1 entre 6 eventos possíveis.

A probabilidade de um gameta formado por um indivíduo heterozigótico ***Aa*** portar o alelo ***A*** ou ***a*** também é um evento aleatório. O conjunto de possibilidades é formado por dois tipos de eventos, o gameta portar o alelo ***A*** e o gameta portar o alelo ***a***, ambos com a mesma chance de ocorrer. Portanto, a probabilidade de um gameta de um indivíduo heterozigótico ***Aa*** portar o alelo ***A***, ou o alelo ***a***, é 1/2, ou 50%.

Eventos independentes

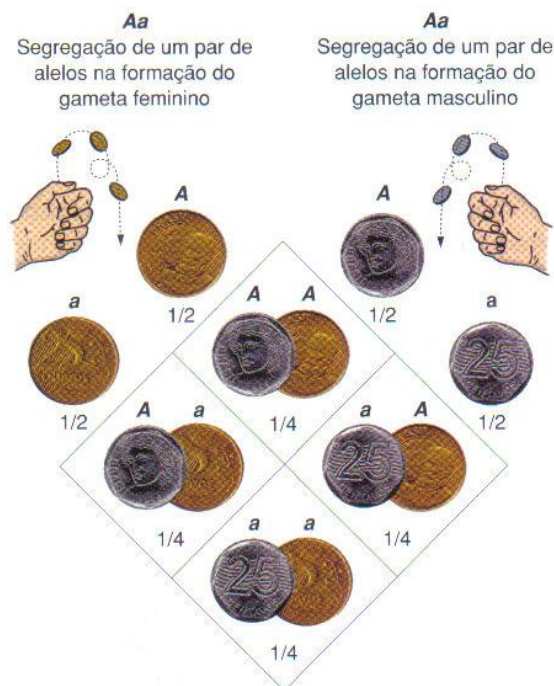
Quando a ocorrência de um evento não afeta a probabilidade de outro evento ocorrer, fala-se em **eventos independentes**. Por exemplo, obter "cara" ao lançar uma moeda não aumenta nem diminui a chance de sair "cara" em um novo lançamento da mesma moeda, ou de outra moeda qualquer. Assim, o resultado obtido em cada lançamento de moeda é um evento independente.

Da mesma maneira, o nascimento de uma criança com determinado genótipo é um evento independente do nascimento de outros filhos de um casal. Por exemplo, mesmo para um casal que já teve cinco filhas, a probabilidade de uma sexta criança ser também do sexo feminino continua a ser 1/2 ou 50%. →

A regra do "e"

A teoria das probabilidades diz que *a probabilidade de dois ou mais eventos independentes ocorrerem conjuntamente é igual ao produto das probabilidades de eles ocorrerem separadamente*. Esse princípio é conhecido popularmente como **regra do "e"**, pois corresponde à pergunta: qual é a probabilidade de ocorrer determinado evento **e** também um outro?

Por exemplo, se jogarmos uma moeda duas vezes, qual é a probabilidade de obtermos duas vezes a face "cara", isto é, de sair face "cara" no primeiro lançamento **e** face "cara" no segundo? A chance de sair "cara" na primeira jogada é 1/2, e a chance de sair "cara" na segunda jogada também é 1/2. Assim, a probabilidade conjunta desses dois eventos ocorrerem é 1/2 × 1/2 = 1/4.

A segregação dos alelos de um gene é um evento casual comparável à obtenção de "cara" ou "coroa" no lançamento de uma moeda. Suponha que o lançamento de uma moeda dourada represente a formação do gameta feminino, que o lançamento de uma moeda prateada represente a formação do gameta masculino, e que "cara" e "coroa" sejam os dois alelos de um gene, ***A*** e ***a***. O resultado da fecundação é comparável à combinação das faces obtidas no lançamento simultâneo das duas moedas. **(Fig. 3.19)**

▲ **Figura 3.19** • Comparação entre as probabilidades de obtenção de cara e coroa no lançamento de duas moedas e a formação de diferentes genótipos pela combinação ao acaso de um par de alelos, em um cruzamento genético.

Vejamos outro exemplo. Qual é a probabilidade de um casal ter dois filhos do sexo masculino? Uma vez que a probabilidade de nascer homem é 1/2, a probabilidade de o casal ter dois meninos, isto é, de o primeiro filho ser homem **e** o segundo também ser homem, é 1/2 × 1/2, ou seja, 1/4.

A regra do "ou"

Outro princípio da teoria das probabilidades diz que *a ocorrência de dois eventos mutuamente exclusivos é igual à soma das probabilidades de ocorrer cada um dos eventos isoladamente*. Eventos mutuamente exclusivos são aqueles em que, ocorrendo um, o outro não ocorre. Esse princípio é conhecido popularmente como **regra do "ou"**, pois corresponde à pergunta: qual é a probabilidade de ocorrer um determinado evento **ou** outro (eventos mutuamente exclusivos)?

Por exemplo, a probabilidade de se obter "cara" **ou** "coroa" no lançamento de uma moeda é igual a 1, ou seja, é a probabilidade de sair "cara" somada à probabilidade de sair "coroa" (1/2 + 1/2 = 1). Da mesma forma, a probabilidade de obter-se "face 1" **ou** "face 6" no lançamento de um dado é 1/6 + 1/6 = 1/3.

Considere agora a seguinte questão: qual é a probabilidade de se obter "cara" e "coroa" no lançamento de duas moedas? Para responder a essa questão devem-se levar em conta as duas maneiras de se obter "cara" e "coroa", quando se lançam duas moedas: pode sair "cara" na primeira e "coroa" na segunda **ou** "coroa" na primeira moeda e "cara" na segunda. Como já vimos, a probabilidade de sair "cara" e "coroa" é 1/4 (1/2 × 1/2); da mesma forma, a probabilidade de sair "coroa" e "cara" é 1/4. Como esses dois eventos são mutuamente exclusivos, devemos somar suas probabilidades, obtendo a probabilidade final de 2/4 ou 1/2 (1/4 para "cara" e "coroa" + 1/4 para "coroa" e "cara").

O mesmo raciocínio é válido para a Genética. Por exemplo, um casal quer ter dois filhos; qual é a probabilidade de um ser menina e o outro menino? Há duas maneiras de um casal ter um menino e uma menina; a primeira criança pode ser menino e, a segunda, menina (1/2 × 1/2 = 1/4), **ou** a primeira pode ser menina e, a segunda, menino (1/2 × 1/2 = 1/4). Portanto, a probabilidade de o casal ter uma menina e um menino é 1/4 + 1/4 = 1/2.

Como exercício, tente calcular a chance de um casal ter duas crianças do sexo masculino e uma do sexo feminino. Pense na ordem em que as três crianças podem nascer e faça os cálculos. Confira sua resposta e pense mais sobre o assunto nas Questões para pensar e discutir, no fim deste capítulo. →

Resolução de um problema com probabilidades

O problema

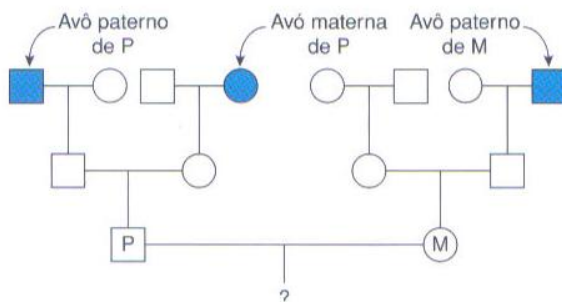
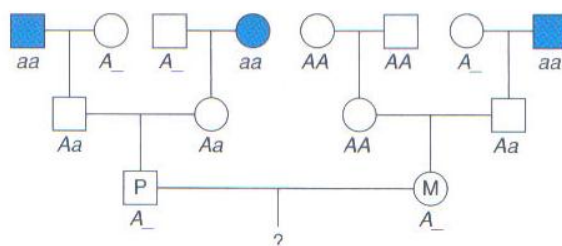
O albinismo tipo I na espécie humana é condicionado por um alelo recessivo. Pedro apresenta pigmentação normal na pele, e seus pais também são normais. Sua avó materna e seu avô paterno, porém, são albinos. Maria também apresenta pigmentação normal na pele; por parte de mãe nunca houve, nem na mais remota ancestralidade, qualquer caso de albinismo. O pai de Maria também é normal, mas seu avô paterno é albino. Pedro e Maria procuram um geneticista para pedir esclarecimentos e aconselhamento genético. O casal tinha as seguintes perguntas:

a) Há alguma chance de termos um filho albino?

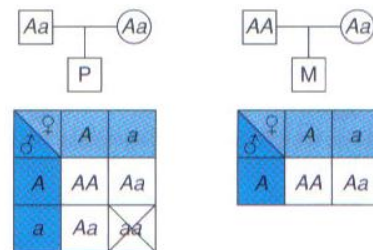
b) Se tivermos um filho albino, qual é a probabilidade de um outro também ser albino?

A solução

Resolver um problema com um enunciado longo como esse torna-se mais fácil reescrevendo os dados de forma esquemática, para simplificá-los. Nesse caso particular, o melhor é construir um heredograma para representar as relações entre os familiares.

Construção do heredograma

Uma vez construído o heredograma, passamos a determinar os genótipos dos indivíduos.

Agora vamos responder à primeira pergunta do problema: há chance de o casal ter uma criança albina? Qual é ela? A resposta à primeira parte da pergunta é afirmativa, uma vez que Pedro e Maria podem ser heterozigóticos para o gene do albinismo. Passamos, então, a estimar as probabilidades de Pedro e Maria serem simultaneamente portadores do alelo para albinismo, pois somente nesse caso eles poderiam ter uma criança albina. Como ambos são normais, concluímos que ambos são portadores de pelo menos um alelo ***A*** em seu genótipo.

A probabilidade de Pedro ser heterozigótico é 2/3, pois ele pode ter recebido um alelo ***A*** do pai e um ***a*** da mãe, um alelo ***a*** do pai e um ***A*** da mãe, ou um alelo ***A*** do pai e um ***A*** da mãe. Lembre-se de que Pedro não é albino e, portanto, não recebeu o alelo ***a*** de ambos os pais.

A probabilidade de Maria ser portadora do alelo do albinismo é 1/2. Isso porque assumimos que o alelo ***A*** de seu genótipo é proveniente da mãe, supostamente homozigótica ***AA***, pois nunca houve em sua ancestralidade qualquer caso de albinismo. De seu pai, heterozigótico ***Aa***, Maria pode ter recebido o alelo ***a*** com chance de 1/2.

Um filho de Pedro e Maria será albino se ocorrerem, simultaneamente, os seguintes eventos:

Evento 1: Pedro ser heterozigótico (probabilidade = 2/3);

Evento 2: Maria ser heterozigótica (probabilidade = 1/2);

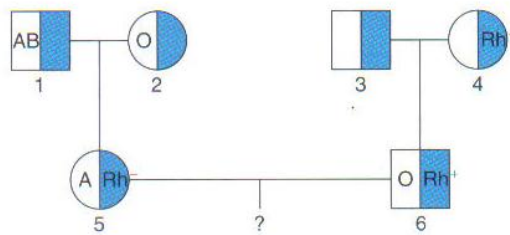
Evento 3: Pedro e Maria transmitirem o alelo ***a*** ao filho (probabilidade = 1/4).

A probabilidade de esses eventos ocorrerem simultaneamente é o produto de suas probabilidades: $2/3 \times 1/2 \times 1/4 = 2/24 =$ **1/12**.

A segunda pergunta do casal acrescenta um dado interessante ao problema. Se Pedro e Maria tiverem efetivamente uma criança albina, desaparecem as dúvidas sobre seus genótipos, pois, nesse caso, eles são certamente heterozigóticos. Assim, o risco de uma próxima criança filha do casal vir a ser albina é 1/4 ou **25%**. ■

QUADRO 3.2 • **Resolução de problema: herança de grupos sangüíneos**

O problema

A árvore genealógica a seguir representa uma família estudada quanto aos grupos sangüíneos do sistema AB0 e do sistema Rh. Na árvore, o símbolo que representa as pessoas — quadrado para homem e círculo para mulher — é dividido por um traço vertical, com o lado esquerdo representando o fenótipo para o sistema ABO, e o lado direito representando o fenótipo para o sistema Rh.

Sobre essa família, pergunta-se:

a) Qual é a probabilidade de um filho do casal 5 x 6 ter sangue dos tipos O/Rh^+ ou A/Rh^-?

b) Quando o homem 6 ainda era noivo da mulher 5, uma antiga namorada 0/Rh^+ o acusou de ser pai de seu filho, uma criança A/Rh^-. Pelo que se conhece sobre herança dos grupos sangüíneos, essa acusação tem procedência?

A solução

Em primeiro lugar é preciso determinar os genótipos dos indivíduos 5 e 6 aos quais se refere o problema. A mulher 5 tem sangue Rh^- e, portanto, seu genótipo é ***rr***. Como ela tem sangue do tipo A, um de seus alelos é I^A. Como a mãe da mulher 5 tem sangue tipo O (***ii***), ela só pode ter fornecido à filha um alelo ***i***. O genótipo da mulher 5 é, portanto, $I^A i\,rr$. Para determinar o genótipo do homem 6, o raciocínio é o mesmo: como seu fenótipo é O/Rh^+ (***iiR_***) e sua mãe é Rh^- (***rr***), concluímos que ele tem genótipo ***iiRr***.

Com relação ao sistema ABO, a mulher 5 formará dois tipos de gameta: 1/2 I^A e 1/2 ***i***. O homem 6 formará apenas um tipo de gameta, ***i***. Portanto, os filhos desse casal poderão ter sangue do tipo A (1/2 $I^A \times 1\ i$) ou do tipo O (1/2 $i \times 1\ i$), com 50% (1/2) de chance para cada tipo.

Quanto ao sistema Rh, a mulher 5 formará apenas um tipo de gameta, ***r***. O homem 6 formará gametas de dois tipos: 1/2 ***R*** e 1/2 ***r***. Assim, os filhos do casal poderão ter sangue Rh^+ (1 $r \times$ 1/2 R) ou Rh^- (1 $r \times$ 1/2 r), com 50% (1/2) de chance para cada tipo.

Sabendo-se que os alelos que condicionam esess dois grupos sangüíneos segregam-se independentemente, a herança simultânea das duas características pode ser calculada multiplicando-se as probabilidades individuais:

- Probabilidade de um filho vir a ser O/Rh^+ = 1/2 (O) × 1/2 (Rh^+) = 1/4
- Probabilidade de um filho vir a ser A/Rh^- = 1/2 (A) × 1/2 (Rh^-) = 1/4
- Probabilidade de um filho vir a ser O/Rh^+ **ou** A/Rh^- = 1/4 + 1/4 = 1/2

Pode-se também construir o quadrado de Punnett e estimar a probabilidade procurada: **1/2** (1/4 + 1/4).

		Gametas formados por 6 (o pai)	
		iR	***ir***
Gametas formados por 5 (a mãe)	$I^A r$	$I^A iRr$ (A/Rh^+)	$I^A irr$ (A/Rh^-)
	ir	*iiRr* (O/Rh^+)	*iirr* (O/Rh^-)

Podemos agora responder à segunda pergunta do problema: será que o homem 6 pode ser pai de uma criança A/Rh^-, filha de sua antiga namorada O/Rh^+?

O "acusado" (6) tem genótipo ***iiRr***, e a mulher que o acusa tem genótipo ***iiR_***, pois seu sangue é tipo O/Rh^+. Com essas informações, nem é preciso investigar o lado familiar da acusadora, pois, se a criança tem fenótipo A/Rh^-, ela possui necessariamente um alelo I^A, que só pode ter vindo de seu verdadeiro pai. Este poderia ter sangue tipo A ou AB, mas nunca poderia pertencer ao grupo O. O acusado pode, então, ser excluído da suspeita de ser o pai da criança em questão. Como se pode ver, esse tipo de investigação não determina quem é o verdadeiro pai, mas pode excluir os que não podem ser; por isso, é chamado de **teste de exclusão de paternidade**. Atualmente, os testes de exclusão de paternidade têm sido substituídos por exames de DNA, mais precisos e conclusivos. ■

O CASO DE NATHANIEL WU

Nathaniel Wu, na época com 30 anos, trabalhava em um dos melhores laboratórios de pesquisa do mundo e tinha uma excelente reputação como pesquisador criativo e trabalhador dedicado. Seis meses após o nascimento de seu filho, Nathaniel e a esposa de 29 anos decidiram que era o momento de procurar um emprego mais estável e financeiramente seguro. Assim, foi com grande interesse que ele leu em uma revista científica uma boa oferta de emprego na Intercontinental Pharmaceutical Corporation – IPC. Candidatou-se imediatamente e foi selecionado pela companhia para se submeter a uma entrevista de seleção, para um cargo em sua equipe especial de pesquisa.

A Dra. Peters, chefe do comitê de pesquisa, teve uma série de entrevistas com Nathaniel e com outros três candidatos qualificados. Apesar de sua boa qualificação, os outros candidatos não tinham a mesma determinação e objetividade de Nathaniel Wu. Ela ouviu com atenção quando Nathaniel apresentou suas últimas descobertas para a equipe de cientistas do IPC. Eles também ficaram impressionados com o conhecimento de Nathaniel, com sua habilidade como pesquisador e com seu potencial para contribuir com a equipe de pesquisa. Nathaniel prometia ser o tipo de candidato com perspectiva de ter uma longa e produtiva carreira na IPC, e era o tipo de pessoa que a equipe estava procurando.

Como Nathaniel era um cientista bem qualificado, havia uma expectativa de que seu conhecimento e dedicação à pesquisa resultassem na descoberta de novos medicamentos e tratamentos, principais objetivos desse projeto especial de pesquisa. Tais descobertas poderiam melhorar a qualidade de vida de inúmeras pessoas e aumentar dramaticamente os lucros da IPC. Para a empresa, investir alguns milhões de dólares para montar e sustentar o laboratório de Nathaniel parecia um bom investimento.

Havia, porém, uma pequena informação adicional que a Dra. Peters necessitava, antes de recomendá-lo ao Comitê de Seleção de Pessoal. Nathaniel teve de se submeter a exames de sangue para determinar seu perfil genético, como todos os outros candidatos. O exame revelou que Nathaniel era portador do alelo para doença de Huntington (coréia de Huntington). Quando perguntado sobre isso, Nathaniel revelou não saber nada a respeito de sua história familiar, porque havia sido adotado muito jovem. Após se submeter a um aconselhamento genético sobre as implicações dessa revelação, Nathaniel ainda desejava o emprego.

Para ter uma idéia mais clara do impacto dessa nova informação sobre sua recomendação, a Dra. Peters requisitou informações do diretor médico da IPC. As informações foram as seguintes:

A doença de Huntington (DH) é uma doença genética, com herança autossômica dominante; sua incidência na América do Norte é de 1 em cada 20 mil pessoas, sendo extremamente rara em orientais. Pessoas portadoras do alelo para DH irão, em certa época da vida, em geral entre 35 e 45 anos, desenvolver os sintomas da doença. A enfermidade caracteriza-se pela degeneração progressiva de células nervosas no sistema nervoso central. O paciente começa a ter movimentos involuntários, com contorções dos braços e pernas e espasmos faciais. Alterações da personalidade, até risadas impróprias, crises de choro, episódios de fúria, perda de memória, e comportamento bizarro, quase esquizofrênico, podem preceder ou suceder os distúrbios de movimento; o quadro clínico é muito variável. A enfermidade é fatal, com a morte ocorrendo entre 50 e 60 anos. O paciente geralmente entra em estado quase vegetativo nos últimos anos de vida. Apesar de não ser possível prever a idade precisa de início dos sintomas, o fato de Nathaniel ter atingido

os 30 anos sem ter apresentado nenhum sintoma identificável significa que ele tem aproximadamente 60% de chance de que os sintomas se iniciem por volta dos 40 anos. Logo após o início dos sintomas, uma pessoa com doença de Huntington torna-se geralmente incapaz de realizar de modo seguro e produtivo os afazeres de um laboratório. O tratamento médico de um paciente com DH pode ser extremamente caro, requerendo internações em hospitais ou casas de saúde. Mesmo sem testar a Sra. Wu, pode-se prever que seu filho tem 50% de chance de ser portador do alelo para DH.

A Dra. Peters passou a enfrentar um dilema de consciência. Deveria recomendar a contratação de Nathaniel Wu pela IPC? Por um lado, ela sabia que sua habilidade como cientista o qualificava muito bem para o projeto científico especial. Ele poderia auxiliar a IPC a desenvolver novos produtos e trazer uma grande quantidade de inovações com sua experiência laboratorial, o que seria uma vantagem da IPC no combativo e competitivo mundo da indústria farmacêutica. Ela também sabia que o objetivo da equipe de pesquisa especial era realizar um trabalho a longo prazo, e ninguém podia prever quanto tempo iria levar para se descobrirem novas drogas e tratamentos. Ela não podia saber por quanto tempo Nathaniel se manteria como um cientista ativo. A IPC estava investindo uma grande soma de dinheiro para levar avante esse projeto especial de pesquisa. Os gastos médicos e outros custos como seguro para invalidez, se Nathaniel começasse a desenvolver os sintomas, seriam elevados. Em vista disso, a Dra. Peters decidiu listar os prós e contras da contração de Nathaniel para seu grupo especial de pesquisa e levar essa informação para o Comitê de Seleção de Pessoal da IPC.

[O caso de Nathaniel Wu é uma situação hipotética de como informações geradas pelo Projeto Genoma Humano poderiam ser utilizadas para discriminar pessoas. O texto que você acabou de ler faz parte de uma proposta de atividade do livro *Mapping and Sequencing the Human Genome: Science, Ethics and Public Policy* (*Mapeando e seqüenciando o genoma humano: ciência, ética e política pública*). A seguir, apresentamos as propostas do texto.]

Escreva uma razão por quê a IPC deveria contratar Nathaniel Wu para seu grupo especial de pesquisa e uma razão por quê não deveria contratá-lo. Esteja preparado para discutir essas razões com seus colegas. Tenha em mente as seguintes questões: uma empresa tem direito de submeter seus funcionários e aspirantes a cargos a exames genéticos? Tal procedimento deveria ser legalizado ou proibido por lei? Empresas de seguro-saúde têm direito de solicitar exames genéticos e recusar segurados, ou cobrar preços diferenciados para os que tenham possibilidade de manifestar doenças hereditárias?

- **Fonte:** Mary Ann G. Cutter e outros. *Mapping and Sequencing the Human Genome: Science, Ethics and Public Policy*. Colorado: BSCS & American Medical Association, 1992, p. 51-53.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

3.1 Os conceitos de genótipo e de fenótipo

1. Conceitue genótipo e fenótipo.
2. Comente a expressão: fenótipo = genótipo + ambiente.
3. O que é cruzamento-teste?

3.2 Interação entre alelos de um mesmo gene

4. Comente o conceito de dominância em Genética.
5. Conceitue dominância completa e dominância incompleta, exemplificando.
6. O que se entende por co-dominância? Exemplifique.
7. Conceitue pleiotropia, exemplificando.
8. O que são alelos letais? Cite um exemplo na espécie humana.
9. Conceitue alelos múltiplos e exemplifique.

3.3 Variação na expressão dos genes

10. Conceitue variação descontínua, exemplificando.
11. O que é norma de reação? Exemplifique.
12. Conceitue penetrância gênica, exemplificando.
13. Comente o conceito de expressividade gênica, exemplificando.

3.4 Herança de grupos sangüíneos na espécie humana

14. Conceitue aglutininas e aglutinogênios em relação ao sistema de grupos sangüíneos ABO.
15. Construa uma tabela com os diferentes grupos sangüíneos do sistema ABO, indicando os genótipos possíveis, os aglutinogênios e as aglutininas.
16. Apresente, por meio de uma tabela, os tipos de transfusões possíveis entre os diversos grupos sangüíneos do sistema ABO.
17. Conceitue doador e receptor universais no sistema ABO.
18. Como é feita a determinação do grupo sangüíneo do sistema ABO?
19. Como se explica a existência natural de anticorpos anti-A e anti-B nas pessoas que não possuem os aglutinogênios correspondentes?
20. Construa uma tabela que apresente as relações entre genótipos e fenótipos do sistema MN de grupos sangüíneos.
21. Explique sucintamente como foi descoberto o sistema Rh de grupos sangüíneos.
22. Como é feita a determinação do grupo sangüíneo Rh de uma pessoa?
23. Como é a determinação genética dos grupos sangüíneos do sistema Rh?
24. Descreva a relação entre grupos sanguíneos do sistema Rh e eritroblastose fetal.

Quadro 3.1 Noções de probabilidade aplicadas à Genética

25. Conceitue probabilidade e exemplifique.
26. No contexto da teoria das probabilidades, o que são eventos aleatórios? Exemplifique.
27. O que são eventos independentes? Exemplifique.
28. Explique e exemplifique a regra do "e" em probabilidade.
29. Explique e exemplifique a regra do "ou" em probabilidade.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

30. Sobre a relação entre genótipo, fenótipo e ambiente é correto dizer que o
    a) fenótipo é determinado exclusivamente pelo genótipo.
    b) fenótipo é determinado pelo genótipo em interação com o ambiente.
    c) genótipo é determinado exclusivamente pelo fenótipo.
    d) genótipo é determinado pelo fenótipo em interação com o ambiente.

31. Um gene com dois alelos, entre os quais não ocorre dominância, determina
    a) três fenótipos, cada um correspondente a um genótipo.
    b) dois fenótipos, um correspondente aos genótipos homozigótico dominante e heterozigótico, e outro correspondente ao genótipo homozigótico recessivo.
    c) dois fenótipos, um correspondente aos genótipos homozigótico recessivo e heterozigótico, e outro correspondente ao genótipo homozigótico dominante.
    d) apenas um fenótipo, correspondente aos três genótipos.

32. Quando se deseja determinar o genótipo de um indivíduo portador de uma característica condicionada por um alelo dominante, realiza-se o cruzamento-teste, que consiste em cruzá-lo com um indivíduo
a) igual a ele, ou seja, de fenótipo dominante.
b) híbrido.
c) puro dominante.
d) puro recessivo.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 33 e 34.
a) 100% de indivíduos com fenótipo dominante.
b) 100% de indivíduos com fenótipo recessivo.
c) 75% de indivíduos com fenótipo dominante e 25% com fenótipo recessivo.
d) 50% de indivíduos com fenótipo dominante e 50% com fenótipo recessivo.

33. Se o indivíduo com fenótipo dominante for homozigótico, qual será o resultado do cruzamento-teste?

34. Se o indivíduo com fenótipo dominante for heterozigótico, qual será o resultado do cruzamento-teste?

Utilize as informações a seguir para responder às questões de 35 a 38.
A relação de dominância entre os alelos múltiplos de um dos genes que condicionam a cor da pelagem de coelhos é: C (aguti) > c^{ch} (chinchila) > c^{h} (himalaia) > c (albino).

35. O cruzamento de coelhos agutis homozigóticos com coelhos albinos produzirá descendência constituída por
a) 100% de coelhos agutis.
b) 75% de coelhos agutis e 25% de albinos.
c) 50% de coelhos agutis, 50% de albinos.
d) 25% de coelhos agutis, 25% de chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.

36. O cruzamento de coelhos agutis, filhos de mães albinas, com coelhos albinos produzirá descendência constituída por
a) 100% de coelhos agutis.
b) 75% de coelhos agutis e 25% de albinos.
c) 50% de coelhos agutis, 50% de albinos.
d) 25% de coelhos agutis, 25% de chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.

37. O cruzamento de coelhos himalaias, filhos de mães albinas, com coelhos chinchilas, filhos de mães himalaias, produzirá descendência constituída por
a) 100% de coelhos chinchilas.
b) 50% de coelhos chinchilas e 50% de himalaias.
c) 50% de coelhos chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.
d) 25% de coelhos agutis, 25% de chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.

38. O cruzamento de coelhos himalaias, filhos de mães albinas, com coelhos chinchilas, filhos de mães albinas, produzirá descendência constituída por
a) 100% de coelhos chinchilas.
b) 50% de coelhos chinchilas e 50% de himalaias.
c) 50% de coelhos chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.
d) 25% de coelhos agutis, 25% de chinchilas, 25% de himalaias e 25% de albinos.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 39 a 42.
a) A. c) AB.
b) B. d) O.

39. Qual é o grupo sangüíneo cujas hemácias não aglutinam com nenhum dos dois tipos de soro, anti-A e anti-B?

40. Hemácias que aglutinam tanto com soro anti-A como com anti-B pertencem a que grupo sangüíneo?

41. A que grupo sangüíneo pertencem as hemácias que aglutinam com o soro anti-A mas não com o soro anti-B?

42. A que grupo sangüíneo pertencem as hemácias que aglutinam com o soro anti-B mas não com o soro anti-A?

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 43 a 46.
a) Pode receber de A, B, AB e O, e doar apenas para AB.
b) Pode receber de A e O, e doar para A e AB.
c) Pode receber de B e O, e doar para B e AB.
d) Pode receber apenas de O, e doar para A, B, AB e O.

43. Uma pessoa do grupo sangüíneo A pode receber sangue de pessoas de que grupos e doar para pessoas de que grupos?

44. Uma pessoa do grupo sangüíneo B pode receber sangue de pessoas de que grupos e doar para pessoas de que grupos?

45. Uma pessoa do grupo sangüíneo AB pode receber sangue de pessoas de que grupos e doar para pessoas de que grupos?

46. Uma pessoa do grupo sangüíneo O pode receber sangue de pessoas de que grupos e doar para pessoas de que grupos?

47. Indique a alternativa que melhor expressa a relação de dominância entre os alelos que condicionam os grupos sangüíneos A, B, AB e O.
a) $I^A > I^B > i$. c) $I^A = I^B > i$.
b) $I^A > I^B = i$. d) $I^A = I^B = i$.

48. Duas pessoas, uma do grupo sangüíneo AB e outra do grupo O, podem ter apenas filhos de sangue tipo
a) AB. c) A e B.
b) O. d) A, B e O.

49. Duas pessoas do grupo sangüíneo AB podem ter apenas filhos de sangue tipo
a) AB. c) A e B.
b) O. d) A, B e AB.

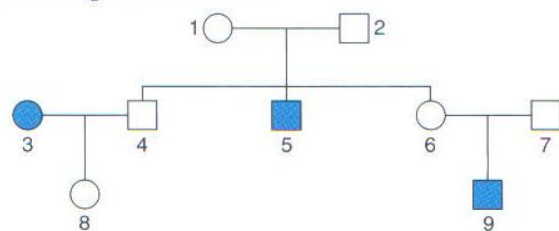
50. Duas pessoas, uma do grupo A e outra do grupo B, ambas com pais do grupo O, podem ter filhos de sangue tipo
a) AB, apenas.
b) A e B, apenas.
c) A, B e O, apenas.
d) A, B, AB e O.

51. Considere as seguintes situações:
I. Mãe Rh positiva e pai Rh negativo.
II. Mãe Rh negativa e pai Rh positivo.
III. Mãe e pai Rh positivos.
IV. Mãe e pai Rh negativos.
Pode acontecer eritroblastose apenas
a) na situação I.
b) na situação II.
c) nas situações I e II.
d) nas situações II e IV.

52. Em drosófila, o mesmo alelo que condiciona a cor branca dos olhos determina ausência de pigmentação nos túbulos de Malpighi e nos tecidos que envolvem as gônadas dos machos. Trata-se, portanto, de um caso de
a) alelos múltiplos.
b) co-dominância.
c) interação gênica.
d) pleiotropia.

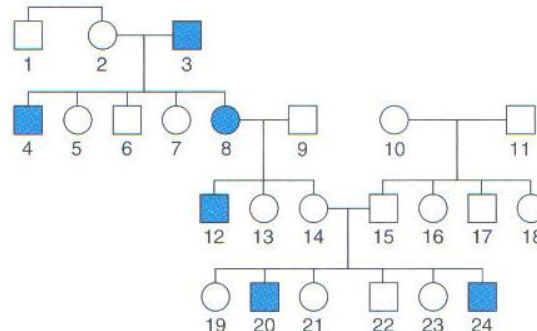
QUESTÕES DISCURSIVAS

53. Sabendo-se que o caráter asa longa é dominante sobre o caráter asa vestigial, qual é o procedimento correto para determinarmos se uma mosca de asa longa é homozigótica ou heterozigótica quanto ao par de alelos que condiciona esse caráter?

54. Analise a árvore genealógica abaixo, em que os indivíduos masculinos são representados por quadrados e os femininos por círculos. Os indivíduos coloridos são homozigóticos recessivos.

Quais indivíduos são, com certeza, heterozigóticos?

55. Com relação ainda à árvore genealógica da questão anterior, responda: qual é a probabilidade de o indivíduo 4 ser heterozigótico?

56. Com referência ainda à árvore da questão de número 54, qual é a probabilidade de que um filho do casal 3 × 4 venha a ser homozigótico recessivo?

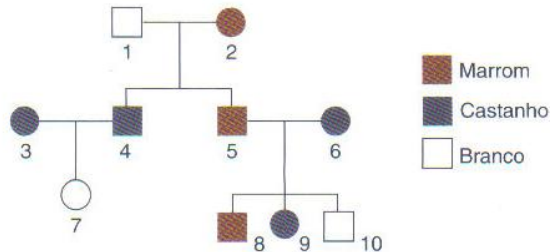
Para os exercícios 57 e 58, considere o "pedigree" de uma família de cães, abaixo. Nele, os indivíduos com um determinado caráter estão assinalados em cor.

57. Qual é a probabilidade de o indivíduo 19 ser heterozigótico?

58. Qual é a probabilidade de um cão gerado do cruzamento entre os indivíduos 15 × 21 ser homozigótico recessivo?

59. Na raça de gado Shorthorn, encontramos indivíduos com pelagem vermelha, indivíduos com pelagem branca e indivíduos com pelagem ruã (uma mistura de vermelho e branco). Cruzamentos entre indivíduos tipo ruão produzem prole na qual 1/4 dos indivíduos apresentam pelagem vermelha, 1/4 apresentam pelagem branca e 1/2 apresentam pelagem ruã.
a) Determine a relação de dominância entre os caracteres em questão.
b) Os resultados estão de acordo com o esperado pela primeira lei de Mendel? Justifique.

60. Em uma manada de gado Shorthorn, de pelagem tipo ruã, existem seiscentas vacas prenhes.
a) Que tipos de coloração de pelagem esperamos encontrar dentre os bezerros que virão a nascer?
b) Qual é a quantidade esperada de bezerros de cada tipo?

61. Em rabanetes, a forma da raiz pode ser arredondada, ovalada ou alongada. Cruzamentos entre plantas de raiz alongada e plantas de raiz arredondada produziram apenas indivíduos com raiz ovalada. Em cruzamentos desses indivíduos entre si foram obtidos 400 descendentes, dos quais 100 apresentaram raízes alongadas, 195 apresentaram raízes ovaladas e 105 apresentaram raízes arredondadas.
a) Determine a relação de dominância entre os caracteres em questão.
b) Determine a proporção entre os diferentes fenótipos e genótipos da geração F_2.
c) Os resultados obtidos estão de acordo com as leis mendelianas da herança? Explique.
d) Se cruzássemos rabanetes ovais com redondos, qual seria a proporção fenotípica esperada na descendência?

62. Em certa espécie de cobaias, uma série de alelos múltiplos controla o pigmento dos pêlos. O alelo G^m produz pêlo marrom-escuro, o alelo g^c produz pêlo castanho-claro e o alelo g^b produz pêlo branco. A relação de dominância entre os três alelos dessa série é $G^m > g^c > g^b$.

Dado o *pedigree* da família, determine:

a) Os genótipos de todos os indivíduos.
b) A probabilidade de 7 × 8, ao se cruzarem, produzirem um animal branco.
c) Se o indivíduo 7 for cruzado com o 5 e produzirem 12 descendentes, quantos se espera que sejam marrom-escuro heterozigóticos?

63. Em um banco de sangue havia à disposição sangue nas seguintes quantidades:

A = 12 litros   AB = 4 litros
B = 10 litros   O = 20 litros

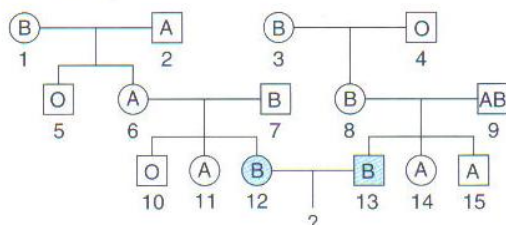
Uma ocasião de emergência fez com que não se pudesse seguir à risca a regra de aplicar transfusões de sangue idêntico. Tendo em vista seu conhecimento sobre o sistema ABO, responda: quantos litros de sangue estariam disponíveis, sem incluir transfusão idêntica, para indivíduos que têm ambos os fatores aglutinogênicos nas hemácias?

64. Considere que os tipos sangüíneos de uma criança e de sua mãe são:

criança: A, Rh^+ mãe: B, Rh^-

Qual (ou quais) dos homens, cujos tipos sangüíneos estão representados a seguir, poderia(m) ser o pai da criança? Justifique sua resposta, representando esquematicamente o tipo de cruzamento sugerido com os genótipos dos três indivíduos envolvidos:

a) O, Rh^+.   c) B, Rh^-.   e) AB, Rh^+.
b) AB, Rh^-.   d) O, Rh^-.

65. A árvore genealógica a seguir mostra os tipos sangüíneos dos indivíduos de uma família. Com base nessas informações:

a) Determine os genótipos dos diversos indivíduos.
b) Calcule a probabilidade de um descendente 12 × 13 ser do sangue tipo O.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

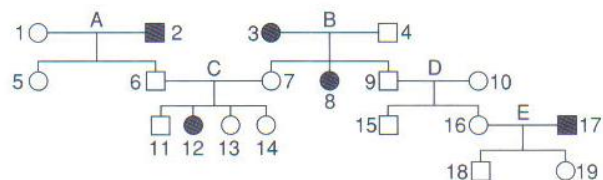
QUESTÕES OBJETIVAS

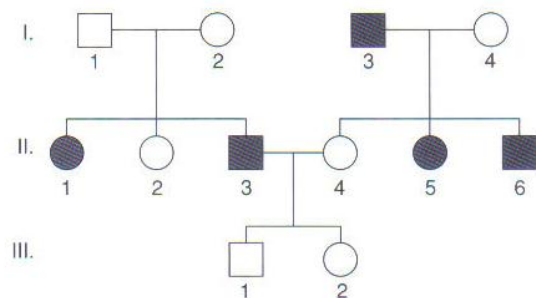
66. (FUVEST) Uma população experimental contém 200 indivíduos AA, 200 aa e 200 Aa. Todos os indivíduos AA foram cruzados com indivíduos aa e os indivíduos Aa foram cruzados entre si. Considerando que cada casal produziu 2 descendentes, espera-se encontrar entre os filhotes:

a) AA – 50; Aa – 500; aa – 50
b) AA – 100; Aa – 400; aa – 100
c) AA – 100; Aa – 1000; aa – 100
d) AA – 200; Aa – 200; aa – 200
e) AA – 200; Aa – 800; aa – 100

67. (PUCRS) No monoibridismo com co-dominância ou dominância intermediária, as proporções genotípicas e fenotípicas observadas na segunda geração dos filhos serão, respectivamente,

a) 1 : 3 : 1 e 3 : 1
b) 1 : 2 : 1 e 1 : 2 : 1
c) 1 : 1 : 2 e 1 : 1 : 1
d) 1 : 3 : 1 e 3 : 1 : 3
e) 1 : 1 : 1 e 3 : 1

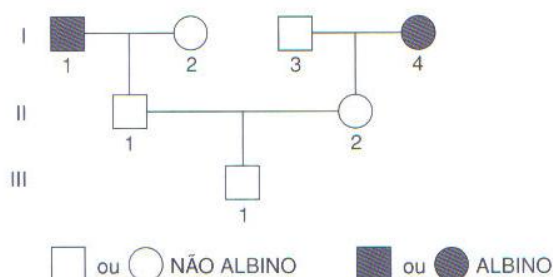
68. (UNIRIO) O popular "Teste-do-pezinho" feito em recém-nascidos pode detectar a doença fenilcetonúria. Tal doença deve-se à presença de uma enzima defeituosa que não metaboliza corretamente o aminoácido fenilalanina, cuja ingestão provoca retardamento mental. Na genealogia a seguir, os indivíduos que apresentam fenilcetonúria estão em negro. Sabendo-se que a determinação do caráter se deve apenas a um par de genes autossômicos, determine o cruzamento que permite diagnosticar a recessividade do gene que condiciona a fenilcetonúria e a probabilidade de nascer uma menina afetada a partir do cruzamento 12 × 18.

a) C e 50%
b) C e 25%
c) B e 6,25%
d) B e 8,25%
e) C e 75%

69. (UFAL) No heredograma abaixo, os símbolos escuros representam indivíduos que possuem uma anomalia.

Considere as seguintes afirmativas sobre esse heredograma:

I. A anomalia é condicionada por um alelo dominante.
II. Todos os indivíduos que apresentam a anomalia são homozigóticos.
III. O único indivíduo que não pode ter o seu genótipo definido é o I-4.

É correto o que se afirma APENAS em

a) I
b) II
c) III
d) I e II
e) II e III

70. (UFPE) Renata (III.1), cuja avó materna e avô paterno eram albinos, preocupada com a possibilidade de transmitir o alelo para o albinismo a seus filhos, deseja saber qual a probabilidade de ela não ser portadora deste alelo. Assinale a alternativa que responde ao questionamento de Renata.

a) 0
b) 1/4
c) 3/4
d) 1/3
e) 1

71. (PUCPR) Num laboratório foram realizados, em cinco indivíduos, exames de sangue para a determinação da tipagem sangüínea dos Sistemas ABO e Rh. Foram obtidas reações com a aplicação dos reagentes anti-A, anti-B e anti-Rh.

Os resultados obtidos foram:

Indivíduo	Soro anti-A	Soro anti-B	Soro anti-Rh
1	aglutinou	não aglutinou	não aglutinou
2	aglutinou	aglutinou	aglutinou
3	não aglutinou	aglutinou	não aglutinou
4	não aglutinou	não aglutinou	não aglutinou
5	aglutinou	aglutinou	não aglutinou

Com base no quadro, conclui-se que são classificados, respectivamente, como receptor e doador universal:

a) 4 e 2
b) 4 e 3
c) 1 e 5
d) 2 e 4
e) 5 e 1

72. (PUCMG) O soro sangüíneo de um indivíduo do grupo O foi colocado em quatro tubos de ensaio, I, II, III e IV, aos quais foram adicionadas, separada e respectivamente, hemácias de indivíduos dos grupos sangüíneos AB, A, B e O.

Marque, nas alternativas a seguir, a opção que corresponde à condição de aglutinação (+) ou não aglutinação (–) de hemácias resultante de reação antígeno-anticorpo:

a) Tubo I (–), Tubo II (+), Tubo III (–) e Tubo IV (+);
b) Tubo I (–), Tubo II (+), Tubo III (+) e Tubo IV (–);
c) Tubo I (+), Tubo II (–), Tubo III (–) e Tubo IV (+);
d) Tubo I (+), Tubo II (+), Tubo III (+) e Tubo IV (–);
e) Tubo I (–), Tubo II (–), Tubo III (–) e Tubo IV (+).

73. (UFSCAR) Em relação ao sistema sangüíneo ABO, um garoto, ao se submeter ao exame sorológico, revelou ausência de aglutininas. Seus pais apresentaram grupos sangüíneos diferentes e cada um apresentou apenas uma aglutinina. Os prováveis genótipos dos pais do menino são:

a) I^Bi - ii.
b) I^Ai - ii.
c) I^AI^B - I^Ai.
d) I^AI^B - I^AI^A.
e) I^Ai - I^Bi.

74. (UFJF) Além do teste de DNA, há exames mais simples que podem ajudar a esclarecer dúvidas sobre paternidade. Por exemplo, o teste de tipagem sangüínea do sistema ABO permite determinar quem não pode ser o pai. Assinale a alternativa que apresenta uma situação em que esse exame assegura a exclusão da paternidade:

a) O filho é do tipo O, a mãe do tipo O e o suposto pai do tipo A.
b) O filho é do tipo AB, a mãe do tipo AB e o suposto pai do tipo O.
c) O filho é do tipo AB, a mãe do tipo A e o suposto pai do tipo B.
d) O filho é do tipo B, a mãe do tipo B e o suposto pai do tipo O.
e) O filho é do tipo A, a mãe do tipo A e o suposto pai do tipo B.

75. (UEL) Os tipos sangüíneos do sistema ABO de três casais e três crianças são mostrados a seguir.

CASAIS	CRIANÇAS
I. AB × AB	a. A
II. B × B	b. O
III. A × O	c. AB

Sabendo-se que cada criança é filha de um dos casais, a alternativa que associa corretamente cada casal a seu filho é:

a) I - a; II - b; III - c
b) I - a; II - c; III - b
c) I - b; II - a; III - c
d) I - c; II - a; III - b
e) I - c; II - b; III - a

76. (UFSM) Para os grupos sangüíneos do sistema ABO, existem três alelos comuns na população humana. Dois (alelos A e B) são co-dominantes entre si e o outro (alelo O) é recessivo em relação aos outros dois.

De acordo com essas informações, pode(m)-se afirmar:
I. Se os pais são do grupo sangüíneo O, os filhos também serão do grupo sangüíneo O.
II. Se um dos pais é do grupo sangüíneo A e o outro é do grupo sangüíneo B, todos os filhos serão do grupo sangüíneo AB.
III. Se os pais são do grupo sangüíneo A, os filhos poderão ser do grupo sangüíneo A ou O.
Está(ão) correta(s):
a) apenas I.
b) apenas II.
c) apenas III.
d) apenas I e III.
e) I, II e III.

77. (FATEC) Paula, portadora do aglutinogênio B e Rh negativo, casou-se com João, portador dos aglutinogênios A e B e Rh positivo. Sabendo-se que a mãe de Paula não possui aglutinogênios e que João teve um irmão com doença hemolítica do recém-nascido, conclui-se que a probabilidade de o casal ter um filho Rh positivo e sangue tipo A é:
a) 9/16
b) 3/16
c) 1/4
d) 1/8
e) 1/2

78. (MACK) O quadro abaixo mostra os resultados das tipagens ABO e Rh de um casal e de seu filho. O sinal + indica reação positiva e o sinal - indica reação negativa.

	soro anti-A	soro anti-B	soro anti-Rh
Pai	+	–	+
Mãe	–	+	–
Criança	–	–	+

Considere as seguintes afirmações:
I. Essa mulher poderá dar à luz uma criança com eritroblastose fetal.
II. Em caso de transfusão sangüínea, a criança poderá receber sangue tanto da mãe quanto do pai.
III. O genótipo do pai pode ser I^AI^ARR.
Assinale:
a) se somente III estiver correta.
b) se somente II estiver correta.
c) se somente I estiver correta.
d) se somente I e III estiverem corretas.
e) se somente II e III estiverem corretas.

79. (PUCRS) Uma mulher com sangue do tipo A / Rh+ / MM é casada com um homem com tipo sangüíneo B / Rh+ / NN. Qual das alternativas abaixo indica o tipo sangüíneo de uma criança que NÃO poderia ter sido gerada por este casal?
a) A / Rh+ / NN
b) A / Rh– / MN
c) AB / Rh– / MN
d) O / Rh+ / MN
e) O / Rh– / MN

80. (FUVEST) Lúcia e João são do tipo sangüíneo Rh positivo e seus irmãos, Pedro e Marina, são do tipo Rh negativo. Quais dos quatro irmãos podem vir a ter filhos com eritroblastose fetal?
a) Marina e Pedro.
b) Lúcia e João.
c) Lúcia e Marina.
d) Pedro e João.
e) João e Marina.

81. (UFAL) Um casal teve uma criança com eritroblastose fetal. Assinale a alternativa abaixo que identifica corretamente os grupos sangüíneos dessa família.
a) MÃE – Rh+; PAI – Rh–; CRIANÇA – Rh+
b) MÃE – Rh+; PAI – Rh–; CRIANÇA – Rh–
c) MÃE – Rh–; PAI – Rh+; CRIANÇA – Rh+
d) MÃE – Rh–; PAI – Rh+; CRIANÇA – Rh–
e) MÃE – Rh–; PAI – Rh–; CRIANÇA – Rh+

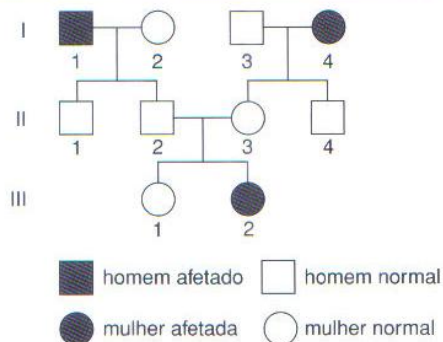
82. (UFPE) Na espécie humana há um gene que exerce ação simultaneamente sobre a fragilidade óssea, a surdez congênita e a esclerótica azulada.
Assinale a alternativa que define o caso.
a) Ligação genética
b) Penetrância completa
c) Pleiotropia
d) Herança quantitativa
e) Polialelia

QUESTÕES DISCURSIVAS

83. (FUVEST) Em uma espécie de planta a forma dos frutos pode ser alongada, oval ou redonda. Foram realizados quatro tipos de cruzamento entre plantas dessa espécie e obtidos os seguintes resultados:

Cruzamento	Tipos de plantas cruzados	Descendência obtida
I	fruto longo × fruto redondo	100% fruto oval
II	fruto longo × fruto oval	50% fruto longo 50% fruto oval
III	fruto redondo × fruto oval	50% fruto redondo 50% fruto oval
IV	fruto oval × fruto oval	25% fruto longo 50% fruto oval 25% fruto redondo

a) Formule uma hipótese consistente com os resultados obtidos para explicar a herança da forma dos frutos nessa espécie.
b) Represente os alelos por letras e indique os genótipos dos indivíduos parentais e dos descendentes no cruzamento IV.

84. (UNESP) Analise a genealogia que apresenta indivíduos afetados por uma doença recessiva e indivíduos normais.

a) Quais os indivíduos representados na genealogia que são obrigatoriamente heterozigotos?
b) Qual a probabilidade de o casal formado pelos indivíduos II2 e II3 ter mais dois filhos, sendo ambos do sexo masculino e afetados?

85. (UFV) A pseudo-acondroplasia é um tipo de nanismo determinado geneticamente pelo alelo D autossômico dominante que interfere no crescimento dos ossos durante o desenvolvimento. A princípio, pensou-se que o fenótipo anão seria expresso pelo genótipo D/D ou D/d. Entretanto, foi considerado que a severidade do alelo dominante, quando em dose dupla, produz efeito letal durante o desenvolvimento embrionário, provocando aborto precocemente. Considere um casal de anões pseudo-acondroplásicos, para responder às seguintes questões:
a) Quais são os genótipos de cada indivíduo do referido casal?
b) Caso a mulher deste casal venha dar à luz uma criança, qual é a probabilidade de ela nascer geneticamente com a pseudo-acondroplasia?
c) Como o casal já tem três crianças com a pseudo-acondroplasia, qual é a probabilidade de, em um eventual quarto nascimento, a criança nascer também afetada?
d) Se o casal tem planos para ter uma menina normal em relação a esta condição genética, qual é a probabilidade que se espera para este evento?
e) Em uma outra família, com 3 meninas e 2 meninos, todos apresentando a pseudo-acondroplasia, quantas destas crianças são homozigotas no loco correspondente a este tipo de nanismo?

86. (UNICAMP) Os grupos sangüíneos humanos podem ser classificados em 4 tipos: A, AB, B e O, pelo sistema ABO e, de acordo com o sistema Rh, como Rh+ e Rh–.
a) Explique como o sangue de uma pessoa pode ser identificado em relação aos sistemas ABO e Rh.
b) Explique por que uma pessoa com sangue tipo O é doadora universal mas só pode receber sangue do tipo O, enquanto uma pessoa com sangue AB é receptora universal mas não pode doar para os outros tipos.

87. (UFRJ) Pode-se usar o sistema ABO para "excluir" um suposto pai em uma investigação de paternidade. Para tal, basta determinar o genótipo e o fenótipo do suposto pai e, por comparação com os fenótipos e genótipos do filho e da mãe, verificar se o homem acusado pode ser considerado como um pai impossível. A tabela a seguir mostra os fenótipos do filho e da mãe em três casos.

Casos	Filho		Mãe		Pai impossível
	Fenótipo	Genótipo	Fenótipo	Genótipo	Fenótipo (s)
1	A	$I^A i$	B	$I^B i$	
2	AB	$I^A I^B$	AB	$I^A I^B$	
3	O	i i	B	$I^B i$	

Indique os fenótipos dos pais que NÃO poderiam ser os pais biológicos de cada caso.

88. (UNICAMP) Na eritroblastose fetal ocorre destruição das hemácias, o que pode levar recém-nascidos à morte.
a) Explique como ocorre a eritroblastose fetal.
b) Como evitar sua ocorrência?
c) Qual o procedimento usual para salvar a vida do recém-nascido com eritroblastose fetal?

89. (UFRJ) O gato siamês é um animal de rara beleza pois a pelagem de seu corpo é clara com extremidades — orelhas, focinho, pés e cauda — pretas. A presença do pigmento que dá a cor negra a essas extremidades é o resultado da atividade de uma enzima que fica inativada acima de 34 °C.
Explique por que esses animais têm a pelagem negra nas extremidades do corpo.

CAPÍTULO

4 LEI DA SEGREGAÇÃO INDEPENDENTE DOS GENES

▶ Diferentes variedades genéticas do milho, *Zea mays*.

4.1 O conceito de segregação independente

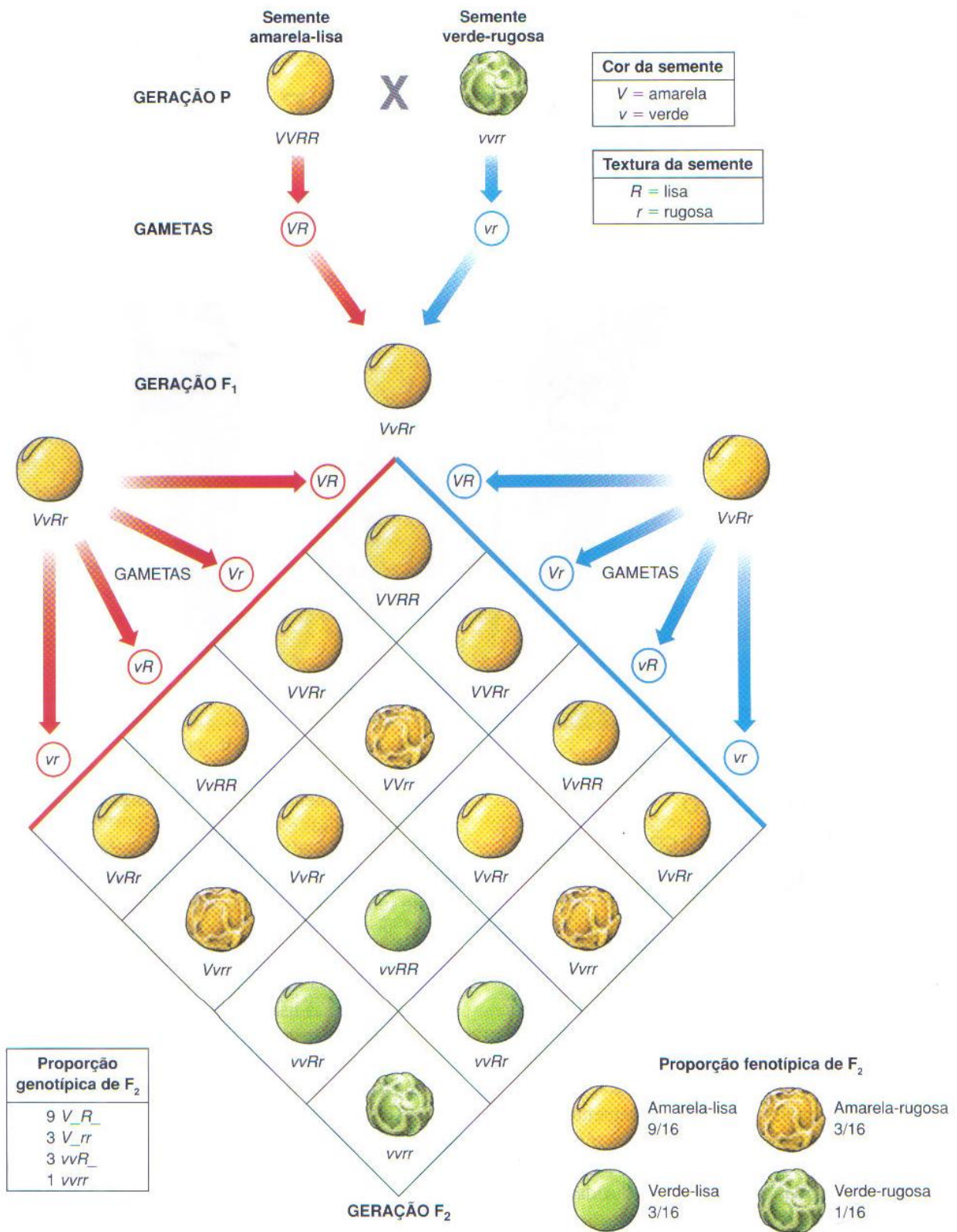
Além de estudar isoladamente diversas características fenotípicas da ervilha, Mendel estudou também a transmissão combinada de duas ou mais características. Em um de seus experimentos, por exemplo, ele considerou simultaneamente a cor dos cotilédones, que faz a semente ser amarela ou verde, e a textura dos cotilédones, que faz a semente ser lisa ou rugosa.

Plantas de ervilha originadas de sementes amarelas e lisas, ambos traços dominantes, foram cruzadas com plantas originadas de sementes verdes e rugosas, traços recessivos. Todas as sementes produzidas na geração F_1 eram amarelas e lisas.

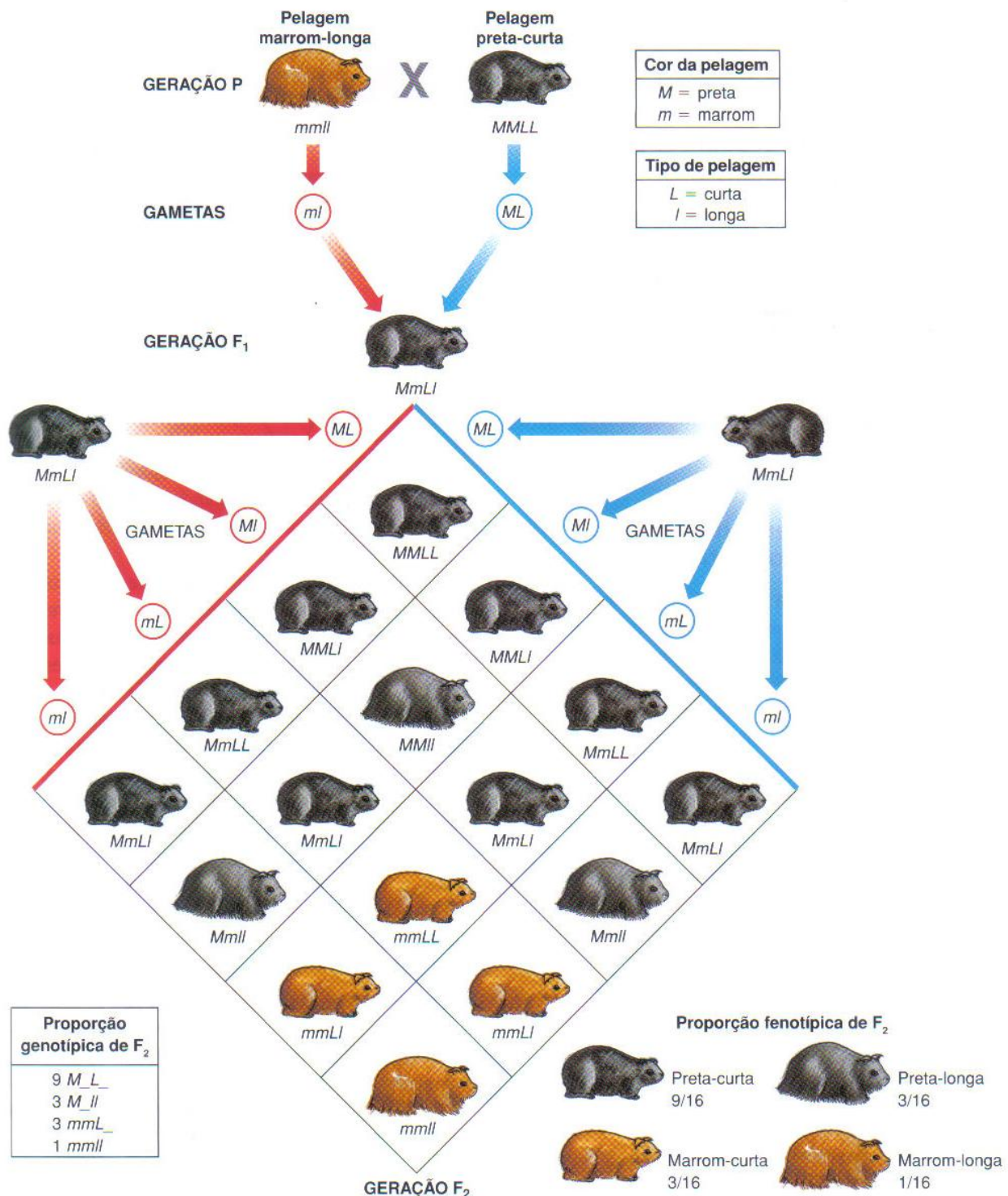
A geração F_2, obtida pela autofecundação das plantas originadas das sementes de F_1, era composta de quatro tipos de sementes: amarelas-lisas, amarelas-rugosas, verdes-lisas e verdes-rugosas.

Seguindo sua idéia de quantificar os resultados obtidos nos cruzamentos, Mendel contou os quatro tipos de sementes de F_2, descobrindo que elas se distribuíam aproximadamente nas seguintes frações: 9/16 amarelas-lisas; 3/16 amarelas-rugosas; 3/16 verdes-lisas; 1/16 verde-rugosa. Em proporção, essas frações representam 9 amarelas-lisas : 3 amarelas-rugosas : 3 verdes-lisas : 1 verde-rugosa.

Com base nesse e em outros experimentos, Mendel aventou a hipótese de que, na formação dos gametas de plantas híbridas, os alelos para a cor da semente (***V/v***) **segregam-se independentemente** dos alelos que condicionam a forma da semente (***R/r***). Ou seja, um gameta portador do alelo ***V*** pode conter tanto o alelo ***R*** como o alelo ***r***, com iguais chances, e o mesmo ocorre com os gametas portadores do alelo ***v***, que podem receber tanto o alelo ***R*** como o alelo ***r***, com iguais chances.

Assim, uma planta duplo-heterozigótica ***VvRr*** formaria, de acordo com a hipótese da segregação independente, quatro tipos de gameta em igual proporção: 1 ***VR*** : 1 ***Vv*** : 1 ***vR*** : 1 ***vr***. A combinação ao acaso desses gametas para formar a geração F_2 resultaria na proporção 9 : 3 : 3 : 1 observada nos experimentos. **(Fig. 4.1)**

▲ **Figura 4.1** • Representação esquemática do cruzamento entre linhagens de ervilhas que diferem quanto à cor e à forma das sementes. Essas características segregam-se independentemente.

No início do século XX, os geneticistas observaram a segregação independente em diversas espécies animais.

Em cobaias, por exemplo, pelagem preta é dominante sobre pelagem marrom, e os pêlos podem ser curtos ou longos, sendo pêlo curto o traço dominante. Os alelos que condicionam essas características segregam-se independentemente, o que resulta no cruzamento de duplo-heterozigóticos, na clássica proporção de 9 : 3 : 3 : 1. **(Fig. 4.2)**

▲ **Figura 4.2** • Representação do cruzamento entre cobaias (porquinhos-da-índia), em que os alelos que condicionam a característica cor da pelagem (preta ou marrom) segregam-se independentemente dos que condicionam o comprimento dos pêlos (curtos ou longos). Esse é um caso que segue a segunda lei de Mendel.

Mendel denominou a segregação independente dos fatores para duas ou mais características de **segunda lei da herança** ou **lei da segregação independente**. Posteriormente esse princípio foi chamada, em sua homenagem, de **segunda lei de Mendel**. **(Fig. 4.3)**

A segunda lei de Mendel pode ser enunciada como a seguir. Os *fatores para duas ou mais características segregam-se no híbrido, distribuindo-se independentemente para os gametas, onde se combinam ao acaso.*

A base celular da segregação independente: meiose

Os homólogos de cada par cromossômico são originalmente provenientes dos gametas materno e paterno. Durante a meiose, homólogos de origem materna e paterna segregam-se com total independência uns dos outros, fazendo com que os genes localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos segreguem-se independentemente. Acompanhe, na descrição a seguir, como a segregação independente de dois pares de cromossomos homólogos resulta na segregação independente dos genes neles localizados.

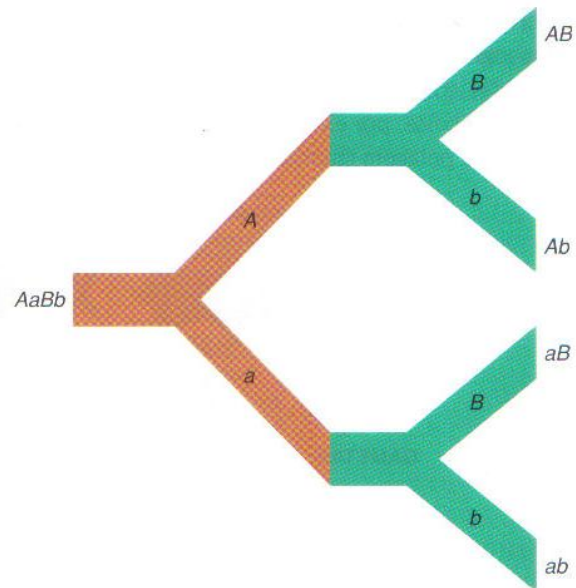
Segregação independente em uma célula duplo-heterozigótica *AaBb*

A figura 4.4 mostra as duas possibilidades de meiose de uma célula duplo-heterozigótica ***AaBb*** em que o par de alelos ***A/a*** situa-se em um par de cromossomos homólogos diferente daquele em que se localiza o par de alelos ***B/b***.

Pouco antes de a meiose ter início, cada cromossomo e seus genes duplicam-se. Durante a divisão meiótica, os membros de cada par de cromossomos homólogos emparelham-se e orientam-se em direção aos pólos da célula. Duas situações, então, podem ocorrer:

1. o cromossomo portador do alelo dominante ***A*** liga-se ao mesmo pólo da célula do cromossomo portador do alelo dominante ***B***; conseqüentemente, o cromossomo portador do alelo recessivo ***a*** liga-se ao mesmo pólo do cromossomo portador de ***b***;
2. o cromossomo portador do alelo dominante ***A*** liga-se ao mesmo pólo da célula do cromossomo portador do alelo recessivo ***b***; conseqüentemente, o cromossomo portador do alelo dominante ***B*** liga-se ao mesmo pólo do cromossomo portador de ***a***.

Se ocorrer a situação 1, formar-se-ão, no final da meiose, dois tipos de célula: ***AB*** e ***ab***. Se ocorrer a situação 2, formar-se-ão outros dois tipos de célula: ***Ab*** e ***aB***.

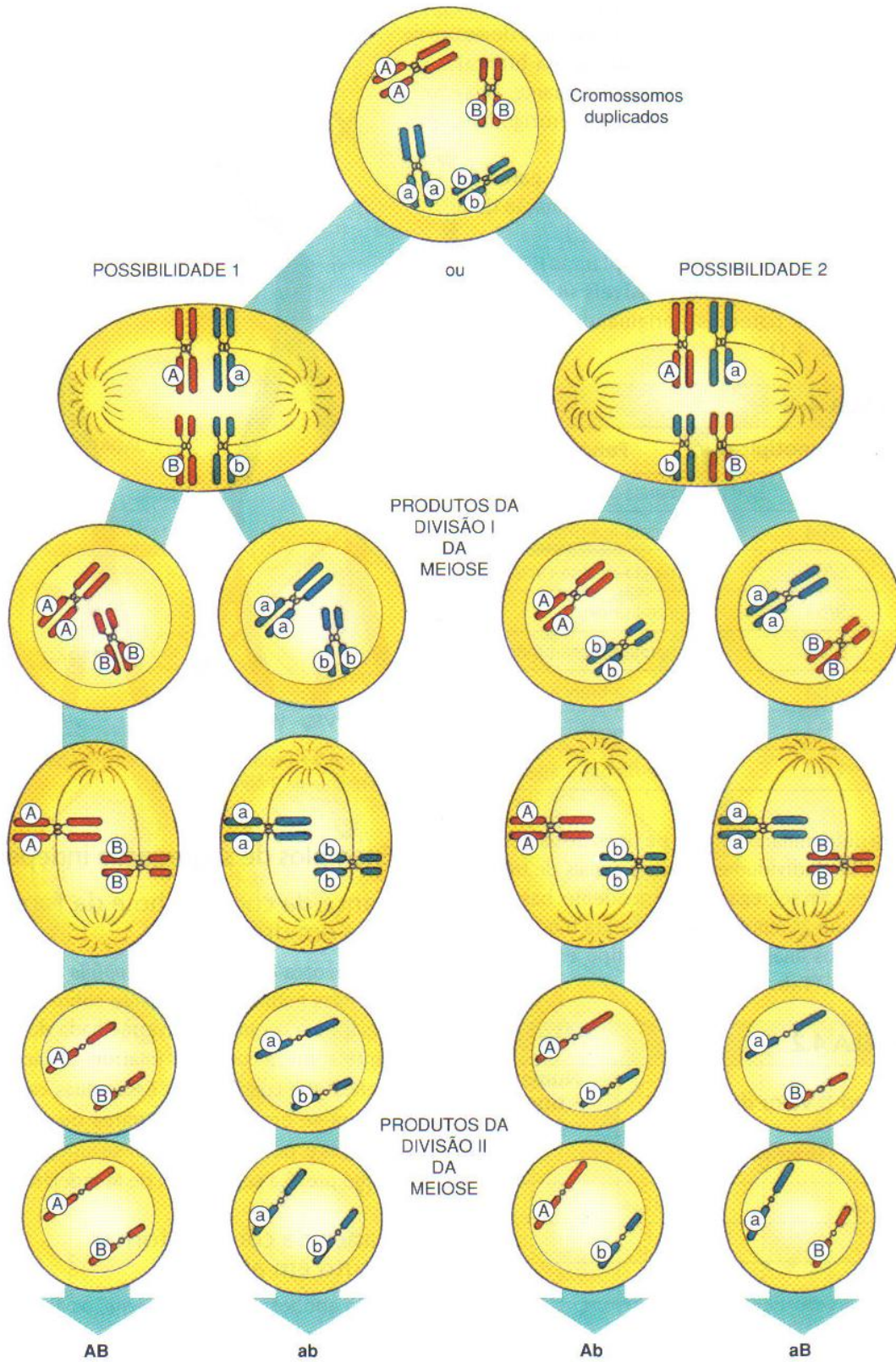
Como a chance de cada célula em meiose seguir um ou outro desses dois caminhos é a mesma, é de esperar que em cerca de metade das células ocorra a primeira situação, com produção de gametas ***AB*** e ***ab***, enquanto na outra metade ocorrerá a segunda situação, com produção de gametas ***Ab*** e ***aB***.

▲ **Figura 4.3** • Representação esquemática da segregação independente de dois pares de alelos em um indivíduo duplo-heterozigótico.

Isso explica porque um indivíduo heterozigótico para dois genes ***AaBb***, localizados em diferentes pares de cromossomos, produzirá quatro tipos de gametas haplóides, com quatro combinações gênicas, em proporções praticamente iguais de 1 ***AB*** : 1 ***Ab*** : 1 ***aB*** : 1 ***ab***. **(Fig. 4.4)**

Assim, o princípio da segregação independente, observado originalmente por Mendel, é válido apenas para genes localizados em diferentes pares de cromossomos. Quando dois ou mais genes estão localizados no mesmo par de cromossomos homólogos, eles não se segregam independentemente (esta situação será apresentada no capítulo 5).

Segregação independente de 3 pares de alelos

Ao estudar simultaneamente 3 pares de características, Mendel verificou que a distribuição dos tipos de fenótipos em F_2 seguia a proporção de **27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 1**. Ele concluiu que os genes para as 3 características consideradas estavam segregando-se independentemente nos indivíduos F_1, originando 8 tipos de gameta.

Em um de seus experimentos, Mendel considerou simultaneamente as seguintes características da semente: cor dos cotilédones (amarelo ou verde), textura da semente (lisa ou rugosa) e cor da casca (cinza ou branca).

▲ **Figura 4.4** • Representação da segregação independente dos cromossomos homólogos na meiose, responsável pela segregação independente dos genes situados em diferentes pares de homólogos. Em uma célula duplo-heterozigótica, há duas possibilidades para a migração dos cromossomos, o que caracteriza a segregação independente.

O cruzamento entre uma planta originada de semente homozigótica dominante para as 3 características (amarela-lisa-cinza) e uma planta originada de semente com traços recessivos (verde-rugosa-branca) produz apenas ervilhas com fenótipo dominante: amarela-lisa-cinza. Esses indivíduos são heterozigóticos para os 3 pares de alelos (***VvRrBb***).

A segregação independente desses 3 pares de alelos, nas plantas da geração F_1, leva à formação de 8 tipos de gameta. **(Fig. 4.5)**

Os gametas produzidos pelas plantas F_1 podem combinar-se de 64 maneiras possíveis (8 tipos maternos × 8 tipos paternos), originando 8 tipos de fenótipo. **(Tab. 4.1)**

TABELA 4.1

Frações fenotípicas	Fenótipos
27/64	Amarela-lisa-cinza
9/64	Amarela-lisa-branca
9/64	Amarela-rugosa-cinza
9/64	Verde-lisa-cinza
3/64	Amarela-rugosa-branca
3/64	Verde-lisa-branca
3/64	Verde-rugosa-cinza
1/64	Verde-rugosa-branca

▲ **Figura 4.5** • Representação esquemática da segregação independente de 3 pares de alelos.

Para determinar o número de tipos de gameta formados por um indivíduo em relação a mais de três pares de genes com segregação independente, basta aplicar a expressão 2^n, em que n representa o número de pares de alelos analisados no genótipo em condição heterozigótica. **(Tab. 4.2)**

TABELA 4.2

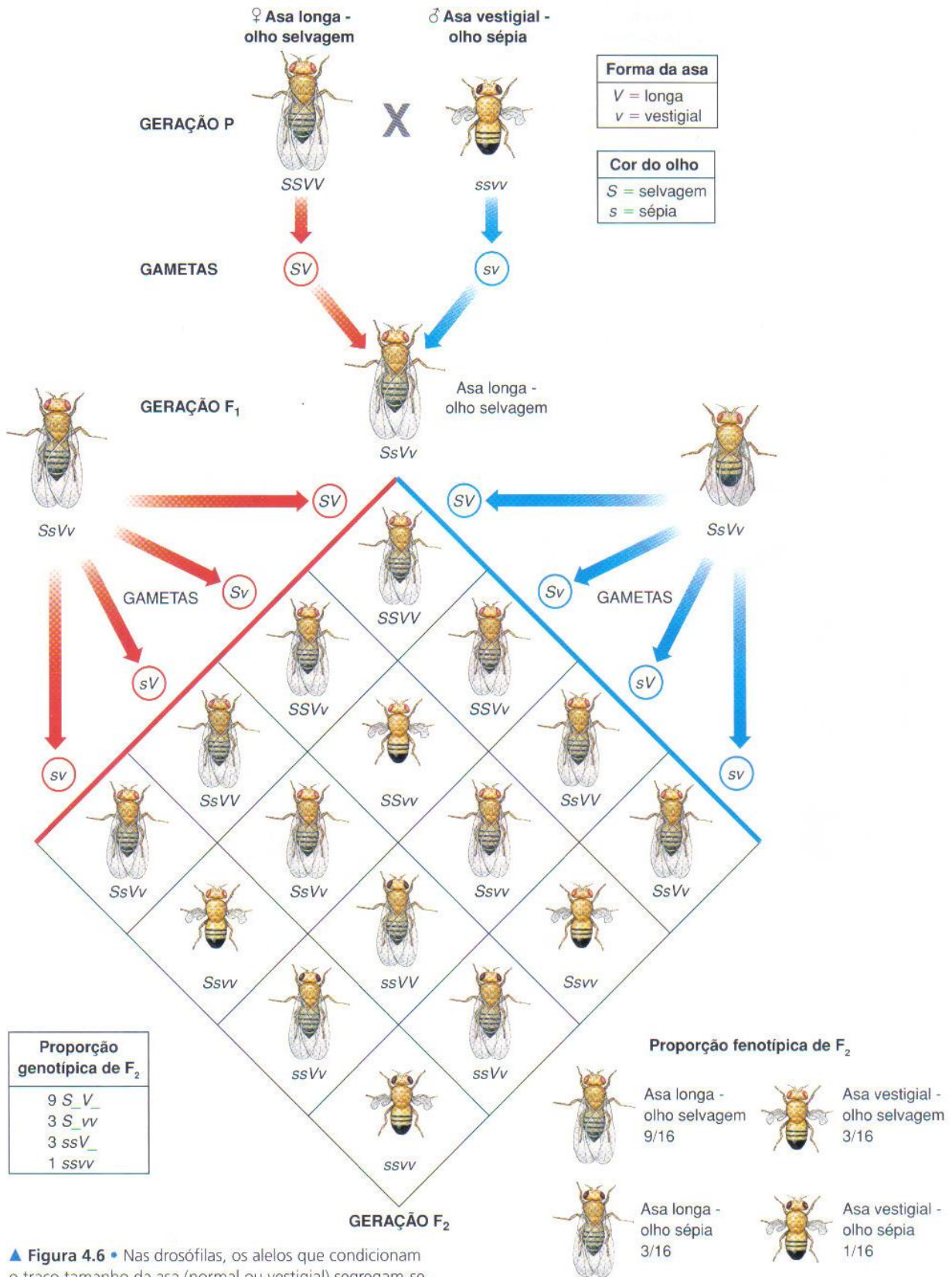
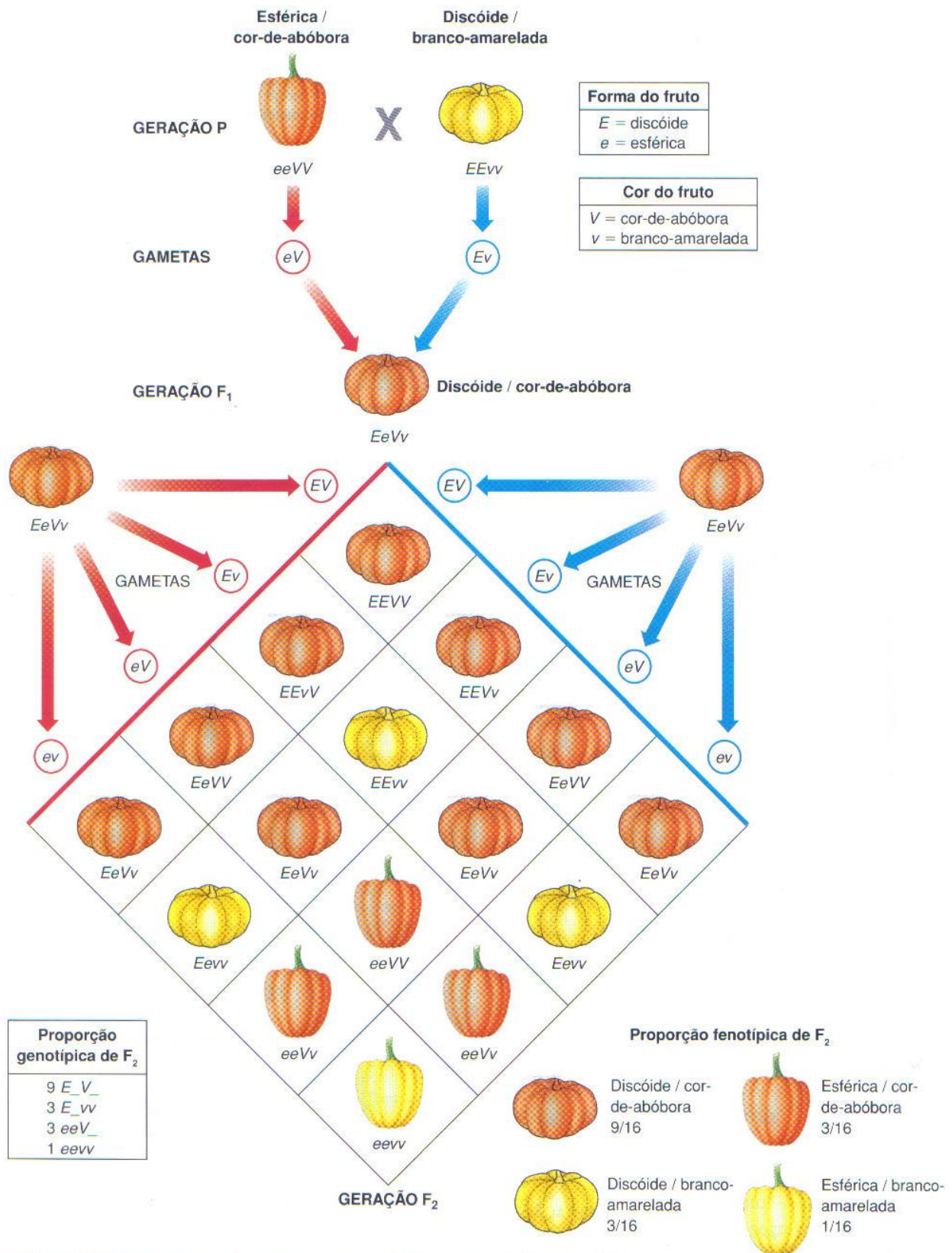
Genótipo	Valor de *n*	2^n	Número de tipos de gametas
AA	0	2^0	1
Aa	1	2^1	2
AaBB	1	2^1	2
AaBb	2	2^2	4
AABbCCDd	2	2^2	4
AABbCcDd	3	2^3	8
AaBbCcDd	4	2^4	16
AaBbCcDdEe	5	2^5	32

Exemplos de segregação independente

Herança da cor do olho e da forma da asa em drosófila

Na mosca-da-banana (*Drosophila melanogaster*) o caráter "asa normal" é dominante sobre o caráter "asa vestigial", e a cor marrom-avermelhada do olho, é dominante sobre a cor sépia (marrom-oliváceo escuro). Os genes que condicionam essas duas características localizam-se em diferentes pares de cromossomos homólogos e, por isso, segregam-se independentemente, como prevê a segunda lei de Mendel. **(Fig. 4.6)**

Herança da cor e da forma do fruto em abóbora

Na abóbora *Cucurbita pepo*, os alelos que condicionam o caráter "forma do fruto" — discóide (dominante) ou esférica (recessiva) — segregam-se independentemente daqueles que condicionam o caráter "cor do fruto" — "cor-de-abóbora" (dominante) ou branco-amarelada (recessiva). **(Fig. 4.7**, na página 70**)**.

▲ **Figura 4.6** • Nas drosófilas, os alelos que condicionam o traço tamanho da asa (normal ou vestigial) segregam-se independentemente dos que condicionam a cor do olho (marrom-avermelhado ou sépia).

▲ **Figura 4.7** • Representação do cruzamento entre abóboras, mostrando que os alelos condicionantes da forma do fruto (discóide ou esférica) segregam-se independentemente dos que condicionam a cor do fruto (cor-de-abóbora ou branco-amarelada).

QUADRO 4.1 • Resolução de problema: genes com segregação independente

O problema

Na planta ornamental cóleo (*Coleus blumei*), a borda das folhas pode ser crenada ou lobada e o padrão das nervuras foliares, regular ou irregular.

O cruzamento de plantas puras de folhas lobadas e nervação irregular com plantas puras de folhas crenadas e nervação regular produziu uma geração F_1 constituída inteiramente por plantas com folhas lobadas e nervação irregular. O cruzamento entre plantas da geração F_1 produziu uma geração F_2 constituída por 112 indivíduos, com os seguintes fenótipos:

63 lobadas-irregulares;
21 lobadas-regulares;
20 crenadas-irregulares;
8 crenadas-regulares.

Pergunta-se:

a) Como podem ser explicados os números da geração F_2?

b) Se as 21 plantas lobadas-regulares fossem cruzadas com plantas duplo-recessivas e, em cada cruzamento, fossem produzidos 5 descendentes, que tipos de fenótipo esperaríamos obter, e em que quantidades?

A solução

• Solução da questão (a)

O primeiro passo é representar esquematicamente as informações fornecidas, o que facilita a análise dos dados:

P: lobadas-irregulares × crenadas-regulares
F_1: 100% lobadas-irregulares
F_2: 63 lobadas-irregulares : 21 lobadas-regulares : 20 crenadas-irregulares : 8 crenadas-regulares

Os resultados mostram que o caráter lobado é dominante sobre o crenado e que o caráter irregular é dominante sobre o regular.

Representando o alelo para folha lobada por ***C*** e o alelo para folha crenada por ***c***, o alelo para nervura irregular por ***R*** e o alelo para nervura regular por ***r***, os genótipos dos indivíduos de F_2 são:

63 lobadas-irregulares = (***C_R_***)
21 lobadas-regulares = (***C_rr***)
20 crenadas-irregulares = (***ccR_***)
8 crenadas-regulares = (***ccrr***)

Será que esses números de descendentes obedecem à proporção 9 : 3 : 3 : 1, indicativa de segregação independente? Para fazer essa verificação, basta multiplicar o total de descendentes (112) pelas frações esperadas para cada classe fenotípica (9/16, 3/16, 3/16 e 1/16). Observe os resultados:

Geração F_2	Número esperado	Número obtido
Lobadas-irregulares	9/16 × 112 = **63**	**63**
Lobadas-regulares	3/16 × 112 = **21**	**21**
Crenadas-irregulares	3/16 × 112 = **21**	**20**
Crenadas-regulares	1/16 × 112 = **7**	**8**

Como se pode ver, os números obtidos no cruzamento são muito próximos dos teoricamente esperados pela lei da segregação independente. Assim, podemos responder à primeira questão:

As proporções de descendentes na geração F_2 estão de acordo com o esperado pela lei da segregação independente dos pares de alelos que condicionam a forma da borda e o tipo de nervura das folhas.

• Solução da questão (b)

Para responder à segunda parte do problema, vamos imaginar que as 21 plantas de folhas lobadas e nervação regular sejam cruzadas com plantas duplo-recessivas. Trata-se, como já vimos, de um cruzamento-teste dessas plantas. Inicialmente, esquematizamos o cruzamento a que a pergunta se refere:

21 lobadas-regulares ***C_rr*** × crenadas-regulares ***ccrr***

As plantas lobadas-regulares (***C_rr***) podem ser homozigóticas ***CC*** ou heterozigóticas ***Cc*** com probabilidades de, respectivamente, 1/3 e 2/3, uma vez que são filhas de pais heterozigóticos. Portanto, das 21 plantas lobadas-regulares de F_2, espera-se que 7 sejam ***CC*** (1/3 de 21) e que 14 sejam ***Cc*** (2/3 de 21). →

Portanto, dos 21 cruzamentos que o problema propõe, espera-se que 7 sejam com plantas ***CCrr*** × ***ccrr*** e 14 com plantas ***Ccrr*** × ***ccrr***. Como o problema determina que cada cruzamento produz 5 descendentes, obteremos 35 (7 × 5) plantas do primeiro tipo de cruzamento e 70 (14 × 5) do segundo tipo.

- No primeiro tipo de cruzamento, temos:

Genitores	***CCrr***	×	***ccrr***
Gametas	***Cr***		***cr***
Descendência		***Ccrr***	

Portanto, espera-se que as 35 plantas produzidas nesse tipo de cruzamento tenham folhas lobadas-regulares (***Ccrr***).

- No segundo tipo de cruzamento, temos:

Genitores	***Ccrr***	×	***ccrr***
Gametas	1/2 ***Cr*** : 1/2 ***cr***		***cr***
Descendência		1/2 ***Ccrr*** : 1/2 ***ccrr***	

Portanto, espera-se que 35 plantas (1/2 de 70) tenham folhas lobadas-regulares (***Ccrr***) e que as outras 35 tenham folhas crenadas-regulares (***ccrr***). Agora podemos responder à segunda questão proposta:

Espera-se encontrar 70 plantas com fenótipo lobado-regular (35 do primeiro tipo de cruzamento e 35 do segundo) e 35 com fenótipo crenado-regular.

4.2 Interações de genes não-alelos

O conceito de interação gênica

A análise das proporções entre as classes fenotípicas da descendência de um cruzamento pode nos informar o número de genes envolvidos no controle de determinada característica. Por exemplo, quando se trata de herança controlada por um único par de alelos com dominância completa, a segregação leva à clássica proporção 3 : 1, ou seja, no cruzamento entre indivíduos heterozigóticos, 3/4 da descendência têm o traço dominante e 1/4 tem o traço recessivo. Isso indica que há apenas um gene envolvido na herança.

Quando analisamos simultaneamente duas características, cada uma condicionada por um par de alelos com dominância completa e segregação independente, a descendência do cruzamento de duplo-heterozigóticos é constituída por 9/16 com ambas as características dominantes, 3/16 com a primeira característica dominante e a segunda recessiva, 3/16 com a primeira característica recessiva e a segunda dominante, e 1/16 com ambas as características recessivas (proporção de 9 : 3 : 3 : 1).

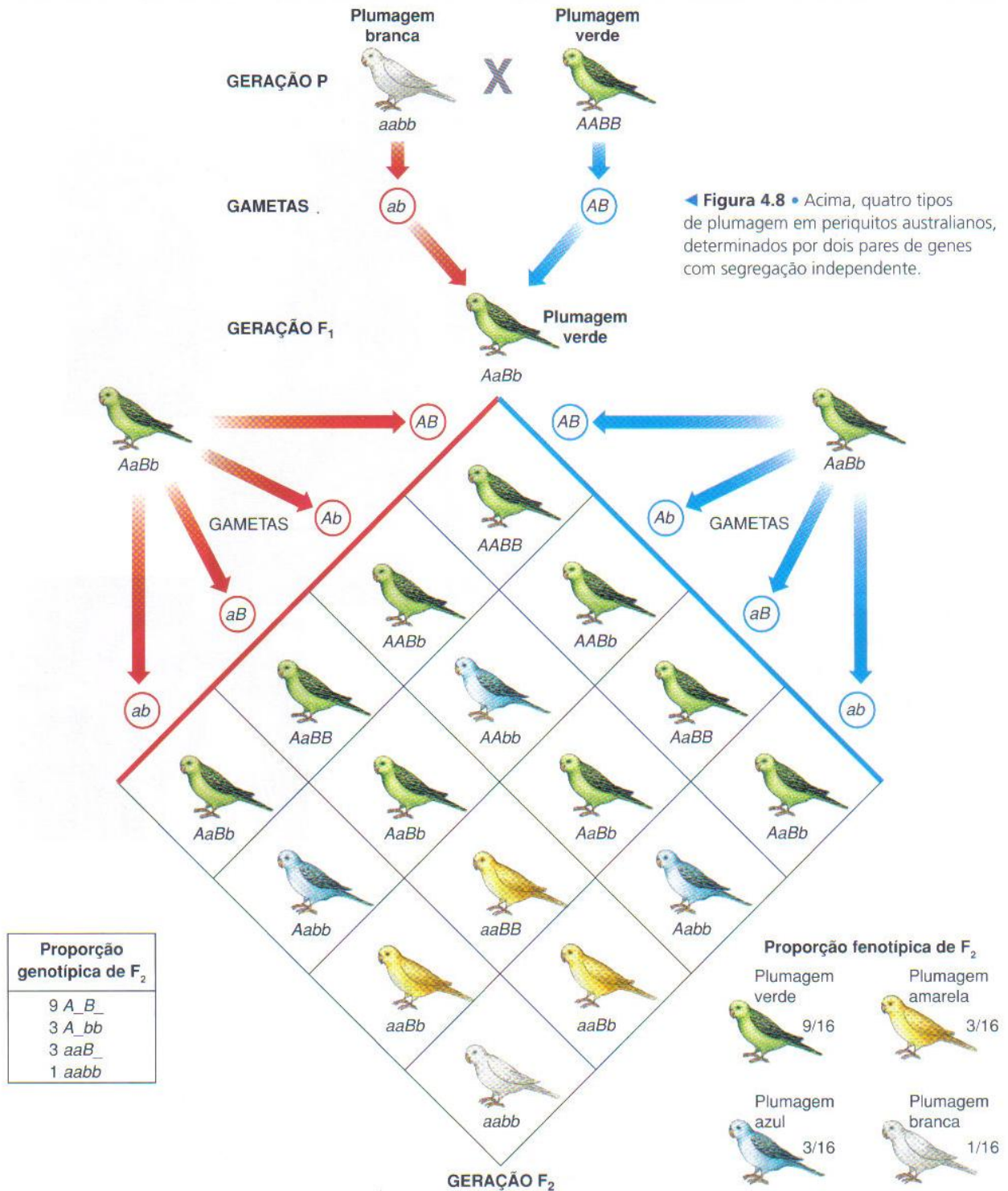
Há casos em que dois ou mais genes, localizados ou não no mesmo cromossomo, agem conjuntamente na determinação de uma característica. Quando isso ocorre, fala-se em **interação gênica**. Muitas características de um ser vivo resultam da ação de diversos genes; por exemplo, estima-se que na pigmentação do olho da mosca drosófila estejam envolvidos mais de 100 genes.

A análise da proporção fenotípica entre os descendentes de um cruzamento, além de informar quantos genes estão envolvidos na formação da característica, pode revelar o tipo de interação existente entre eles. Vejamos a seguir alguns exemplos de interação.

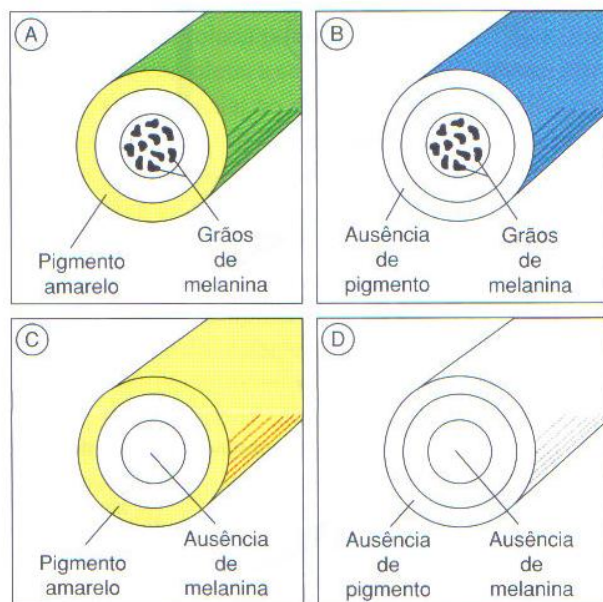
Interação gênica na cor da plumagem de periquitos

Periquitos australianos apresentam grande diversidade de cores, determinadas por dezenas de genes. No entanto, na determinação das cores básicas da plumagem dessas aves — verde, azul, amarela e branca — estão envolvidos apenas dois genes, cada um deles com dois alelos ***A/a*** e ***B/b***, que se segregam independentemente. Periquitos homozigóticos recessivos quanto a esses dois genes (***aabb***) são brancos; periquitos homozigóticos recessivos ***aa***, mas que possuem pelo menos um alelo dominante ***B*** (***aaBB*** ou ***aaBb***), são amarelos; periquitos homozigóticos recessivos ***bb***, mas que possuem pelo menos um alelo dominante ***A*** (***AAbb*** ou ***Aabb***), são azuis; periquitos que apresentam pelo menos um alelo dominante de cada gene (***AABB***, ***AABb***, ***AaBB*** ou ***AaBb***) têm cor verde.

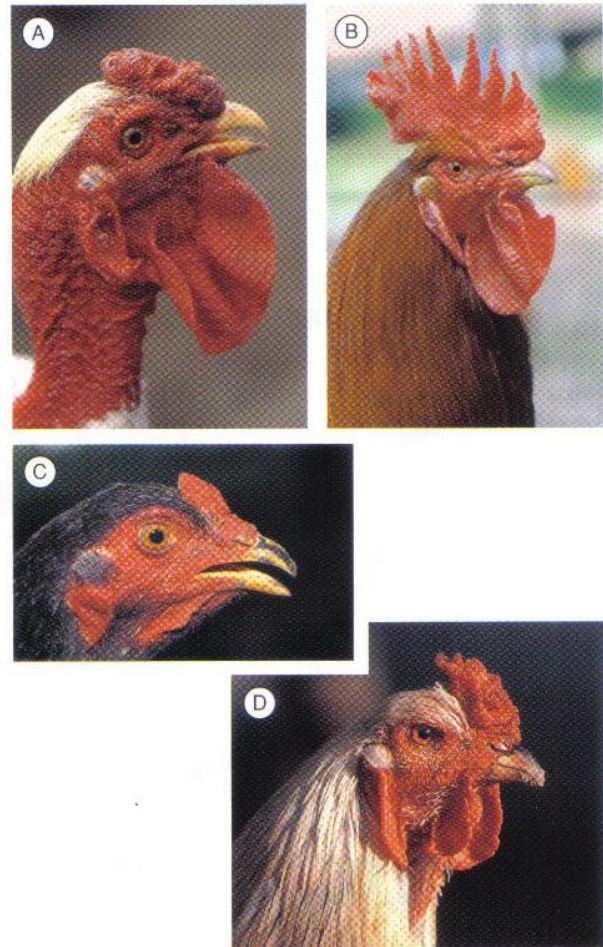
O cruzamento de periquitos verdes duplo-heterozigóticos (***AaBb***) produz quatro tipos de descendentes: verdes, azuis, amarelos e brancos. A proporção esperada dessas aves na descendência é de 9 verdes : 3 azuis : 3 amarelos : 1 branco, uma vez que esses genes têm segregação independente. **(Fig. 4.8)**

◄ **Figura 4.8** • Acima, quatro tipos de plumagem em periquitos australianos, determinados por dois pares de genes com segregação independente.

Hoje sabe-se que a cor básica da plumagem dos periquitos é condicionada por dois genes, que controlam a produção de dois tipos de pigmento de penas. O alelo ***A*** condiciona a produção de **melanina**, um pigmento escuro cuja presença nas penas determina cor azul, devido à dispersão de luz nas camadas superficiais da pena, contra o fundo escuro da melanina, no centro da pena (veja a explicação física deste fenômeno mais adiante, no item sobre cor dos olhos humanos). O alelo ***a*** é uma versão alterada do gene, que não determina produção de melanina.

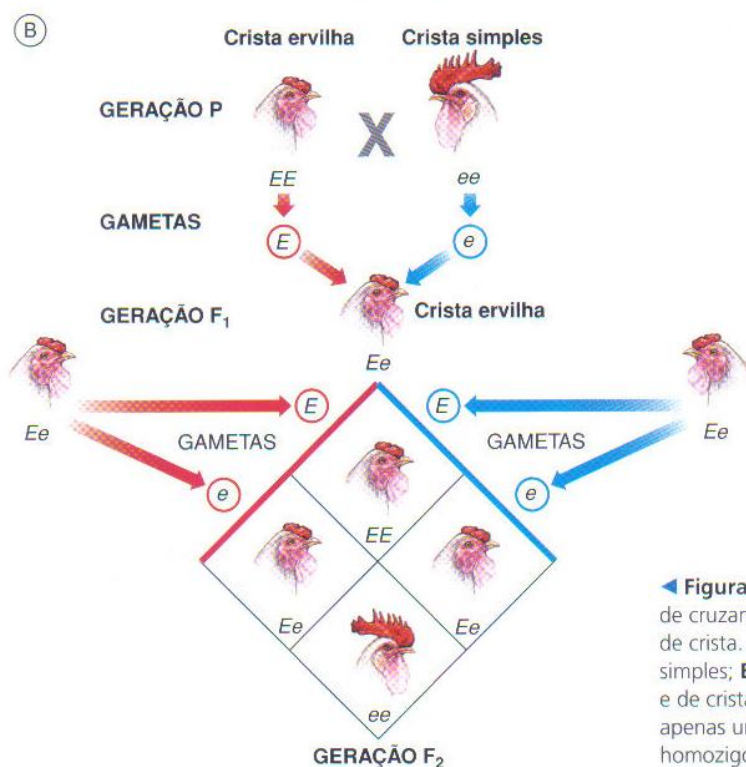
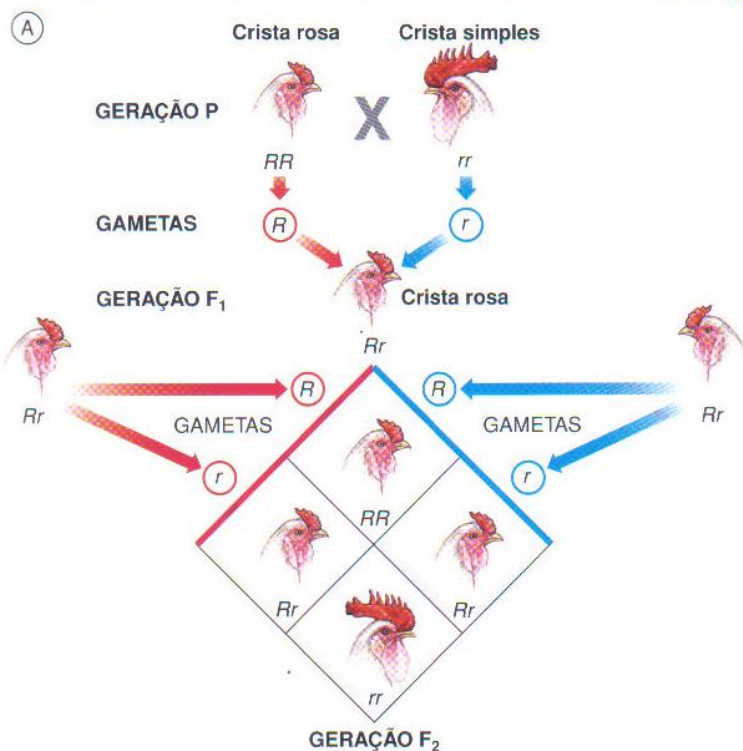
O alelo ***B***, por sua vez, condiciona a deposição na pena de um pigmento amarelo, a psitacina. O alelo ***b*** é uma versão alterada desse segundo gene, que não determina deposição do pigmento psitacina.

Periquitos com genótipo ***aabb*** não têm nenhum dos dois pigmentos nas penas, sendo, portanto, brancos. Periquitos que apresentam pelo menos um alelo normal (dominante) de cada gene (genótipos ***A_B_***) têm os dois pigmentos, apresentando penas verdes; essa cor resulta da mistura do efeito visual azul, causado pela presença de melanina, e do amarelo, causado pela presença do pigmento psitacina. Periquitos que apresentam pelo menos um alelo normal (dominante) do gene para a presença de psitacina (***B_***), sendo homozigóticos para a forma recessiva do gene para produzir melanina (***aa***), têm cor amarela. Periquitos que apresentam pelo menos um alelo normal (dominante) do gene para a produção de melanina (***A_***), sendo homozigóticos para a forma recessiva do gene para a deposição de psitacina (***bb***), têm cor azul. **(Fig. 4.9)**

▲ **Figura 4.9** • Esquemas de cortes transversais das penas de periquitos para mostrar como a presença e a distribuição dos pigmentos melanina e psitacina determinam a cor da plumagem. Acompanhe a figura com as explicações do texto.

Interação gênica na forma da crista de galinhas

Em 1905, o geneticista inglês William Bateson e seus colaboradores concluíram, após uma série de cruzamentos experimentais, que a forma da crista em certas raças de galinhas é condicionada pela interação de dois pares de alelos que se segregam independentemente. As combinações entre os diferentes alelos podem produzir quatro tipos de crista: rosa, ervilha, noz e simples. **(Fig. 4.10)**

▲ **Figura 4.10** • A forma da crista de galinha pode ser ervilha (**A**), simples (**B**), noz (**C**) e rosa (**D**). Essa característica é determinada pela interação de dois pares de alelos com segregação independente.

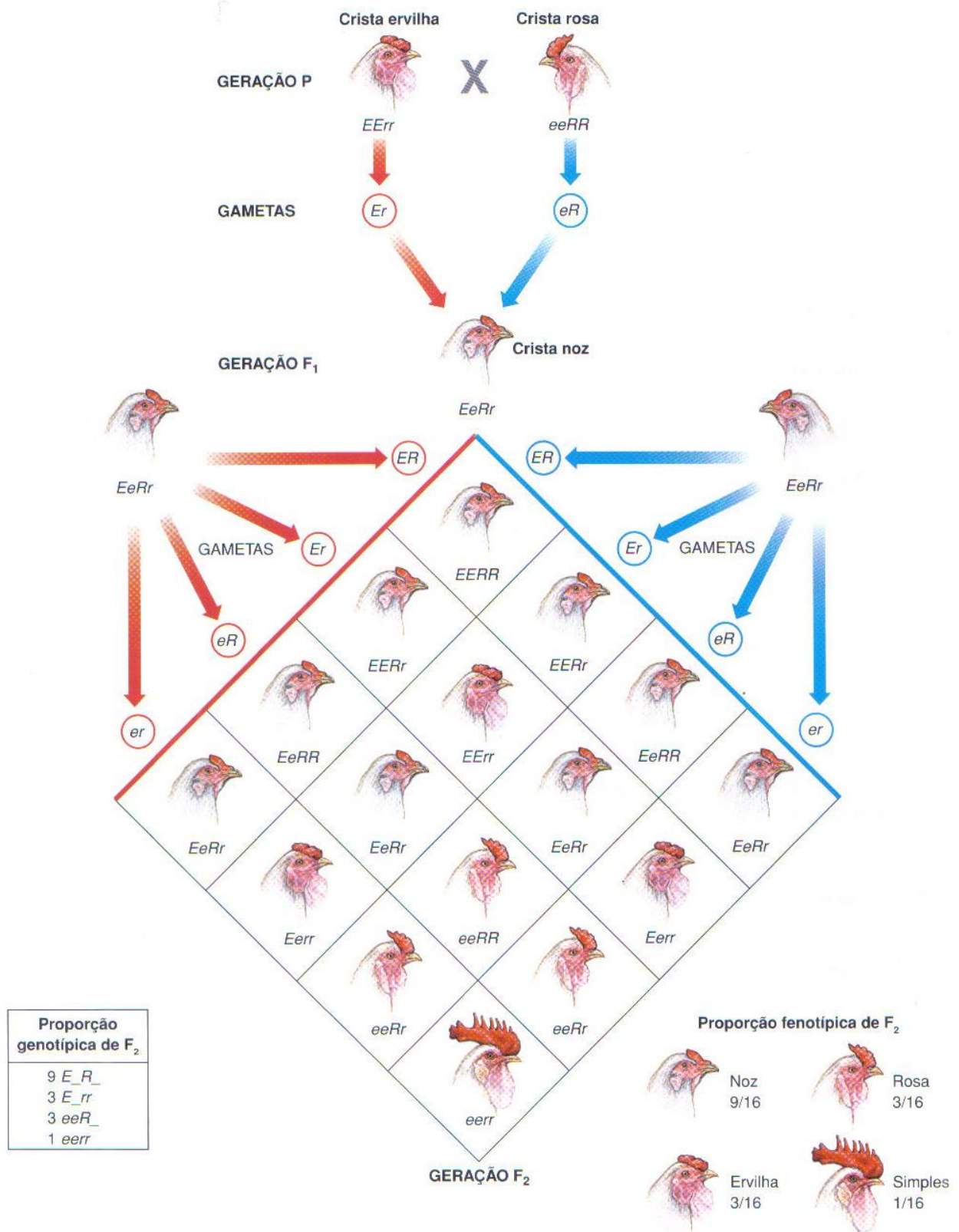
Quando linhagens puras de aves com crista ervilha são cruzadas com linhagens puras de aves com crista simples, obtém-se uma geração F_1 constituída apenas por aves de crista ervilha. No experimento dos pesquisadores ingleses, quando as aves de F_1 foram cruzadas entre si, a descendência foi de 332 aves de crista ervilha e 110 de crista simples, uma proporção muito próxima de 3 : 1.

Ao cruzar linhagens puras de aves de crista rosa com linhagens puras de aves de crista simples, obtém-se uma geração F_1 constituída apenas por aves de crista rosa. No experimento de Bateson, quando as aves de F_1 foram cruzadas entre si, obteve-se uma geração F_2 constituída por 221 aves de crista rosa e 83 de crista simples, proporção também muito próxima de 3 : 1. **(Fig. 4.11)**

Quando linhagens puras de aves de crista rosa são cruzadas com linhagens puras de aves de crista ervilha, todos os descendentes apresentam um único tipo de crista, denominada "noz", diferente das que têm seus genitores. No experimento realizado por Bateson, quando as aves de crista noz de F_1 foram cruzadas entre si, a geração F_2 apresentou 99 aves de crista noz, 26 de crista rosa, 38 de crista ervilha e 16 de crista simples, uma proporção bem próxima de 9 : 3 : 3 : 1. Essa é a proporção esperada no cruzamento de duplo-heterozigóticos quanto a dois pares de alelos com segregação independente.

A título de teste, a equipe de Bateson cruzou algumas aves de crista noz da geração F_1 com aves de crista simples, de genótipo supostamente duplo-recessivo ***rree***, foram obtidos 139 descendentes com crista noz, 142 com crista rosa, 112 com crista ervilha e 141 com crista simples, uma proporção muito próxima de 1 : 1 : 1 : 1. Esses resultados confirmam que os indivíduos noz de F_1 são duplo-heterozigóticos e produzem quatro tipos de gameta em iguais freqüências, como é esperado pela lei da segregação independente.

Bateson e seus colaboradores concluíram, então, que o tipo de crista em galinhas é condicionado por dois pares de alelos, ***R*/*r*** e ***E*/*e***, que segregam independentemente, mas interagem entre si na produção da forma da crista. A interação entre os alelos dominantes ***R*** e ***E*** resulta em crista noz; entre o alelo dominante ***R*** e o recessivo ***e*** resulta em crista rosa; entre o alelo recessivo ***r*** e o dominante ***E*** resulta em crista ervilha, e entre os alelos recessivos ***r*** e ***e*** resulta em crista simples. Observe os resultados dos cruzamentos entre linhagens puras com crista rosa e linhagens puras com crista ervilha na página seguinte. **(Fig. 4.12)**

◄ **Figura 4.11** • Representação esquemática de cruzamentos entre galináceos com diferentes tipos de crista. **A.** Cruzamento entre aves de crista rosa e de crista simples; **B.** Cruzamento entre aves de crista ervilha e de crista simples. Em cada cruzamento foi representado apenas um dos genes pelo fato de as aves terem genótipo homozigótico e idêntico quanto ao outro.

Proporção genotípica de F_2
9 *E_R_*
3 *E_rr*
3 *eeR_*
1 *eerr*

▲ **Figura 4.12** • Representação esquemática de um cruzamento entre galináceos de crista rosa e de crista ervilha. Estão representados os dois genes pelo fato de os indivíduos diferirem entre si quanto a ambos.

Epistasia

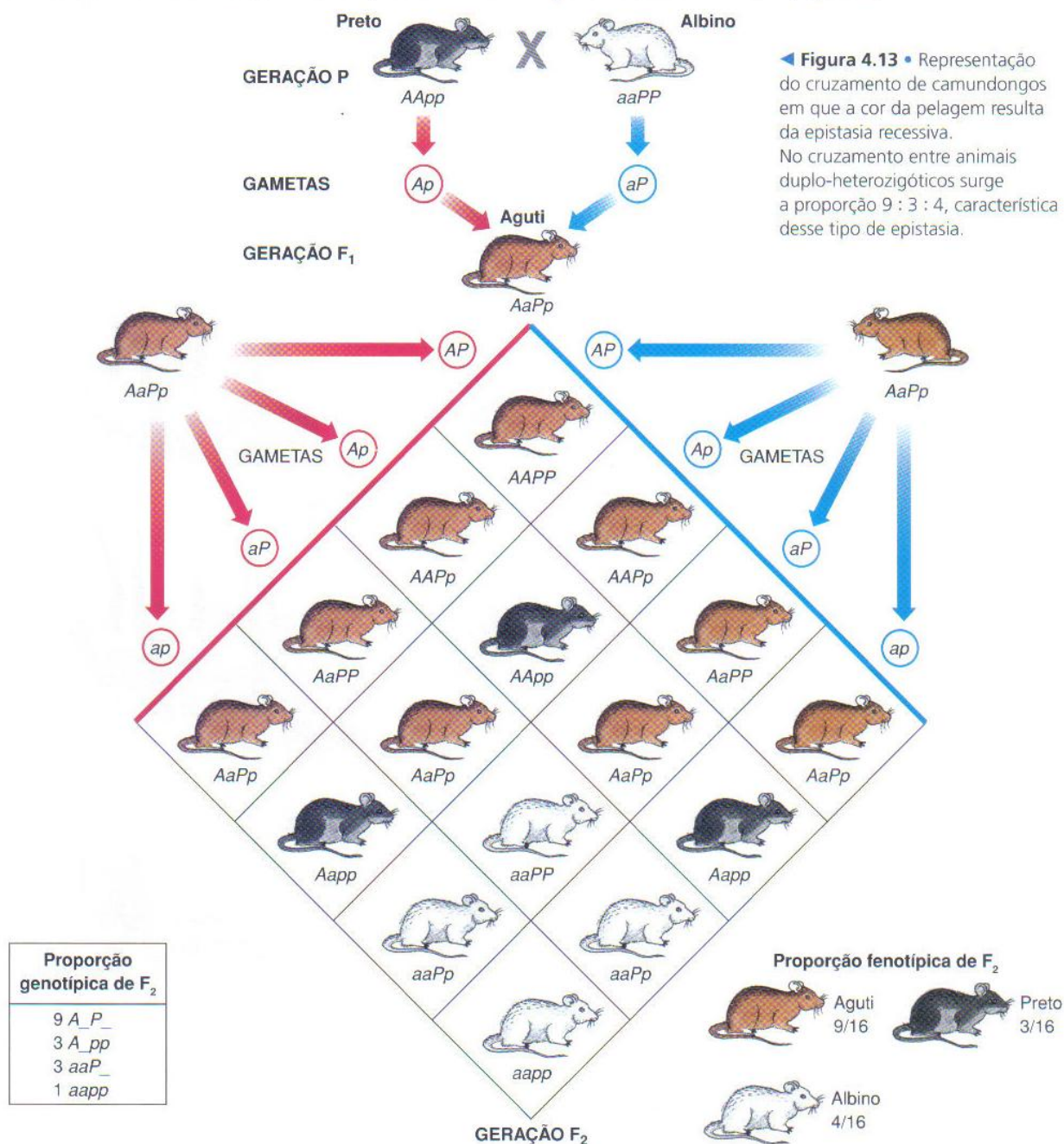
Há casos em que os alelos de um gene impedem a expressão dos alelos de outro par, que pode ou não estar no mesmo cromossomo. Esse fenômeno é chamado de **epistasia** (do grego *epi*, sobre, e *stasis*, parada, inibição). O alelo que exerce a ação inibitória é chamado de **epistático**, e o que sofre a inibição é chamado de **hipostático**.

Se o alelo epistático atuar em dose simples, isto é, se a presença de um único alelo epistático for suficiente para causar a inibição do hipostático, fala-se em **epistasia dominante**. Por outro lado, se o alelo que determina a epistasia atuar somente em dose dupla, fala-se em **epistasia recessiva**.

Exemplo de epistasia recessiva em camundongos

Certas linhagens de camundongo podem ter pelagem **aguti** (castanho-acinzentada), **preta** ou **albina** (esta última é branca, devido à ausência de pigmento). Quando camundongos pretos são cruzados com camundongos albinos, os descendentes são todos aguti. O cruzamento entre camundongos aguti produz uma geração F_2 constituída por 9/16 de camundongos aguti, 3/16 de pretos e 4/16 de albinos. **(Fig. 4.13)**

Proporção genotípica de F_2
9 *A_P_*
3 *A_pp*
3 *aaP_*
1 *aapp*

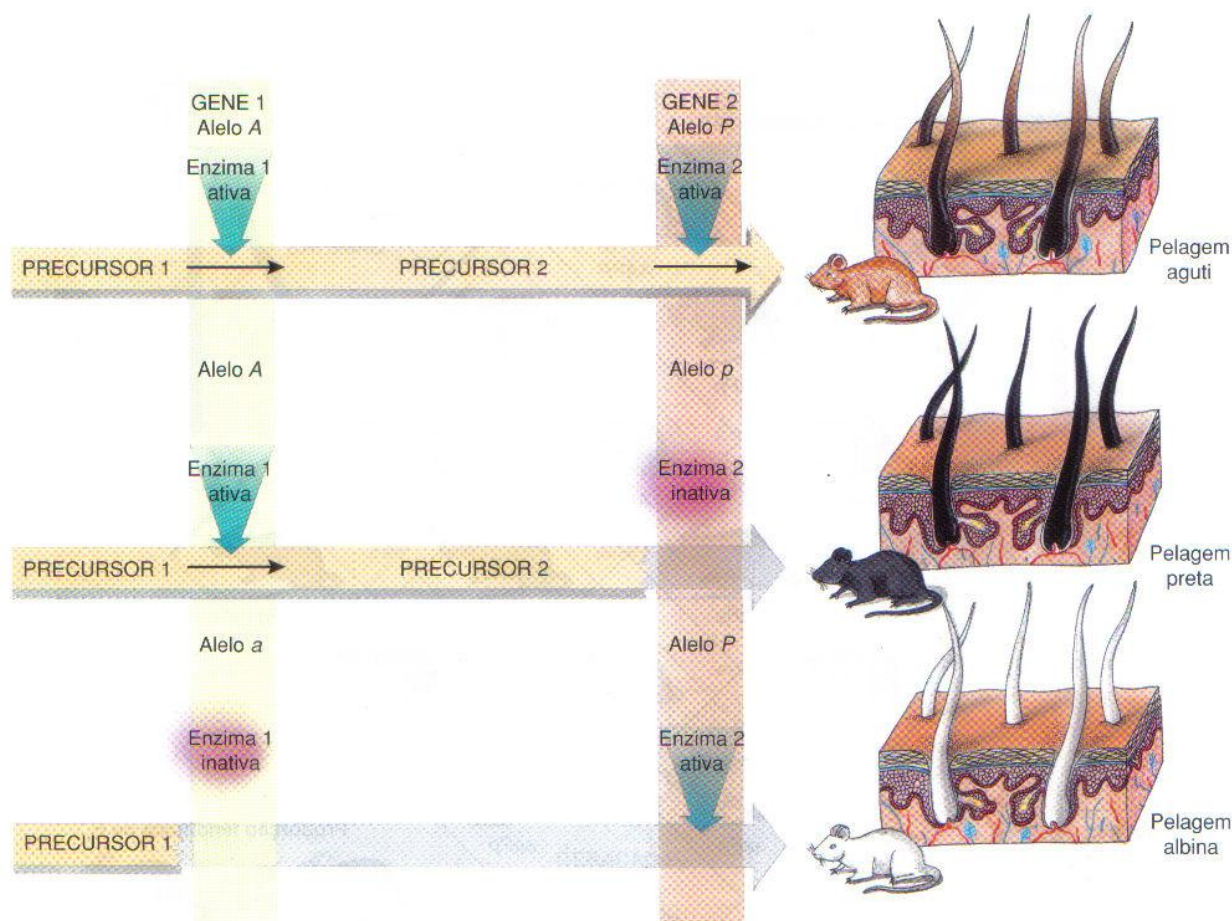
Figura 4.13 • Representação do cruzamento de camundongos em que a cor da pelagem resulta da epistasia recessiva. No cruzamento entre animais duplo-heterozigóticos surge a proporção 9 : 3 : 4, característica desse tipo de epistasia.

A proporção 9 : 3 : 4 pode ser explicada admitindo-se a existência de dois pares de alelos, com segregação independente, que controlam a cor da pelagem. Um dos pares, ***P/p***, é responsável pela cor dos pêlos: o alelo ***P*** condiciona pelagem aguti e o alelo ***p***, pelagem preta. Outro par de alelos, ***A/a***, afeta a expressão do gene para cor da pelagem: o alelo ***A*** permite a manifestação de ***P*** e de ***p***, enquanto o alelo ***a*** é epistático e sua presença em dose dupla determina a ausência de pigmentos.

Basta que um camundongo tenha o par ***aa*** em seu genótipo (__***aa***) para que não haja produção de pigmento. O gene epistático ***a***, portanto, comporta-se como recessivo, daí esse tipo de interação gênica ser conhecida como epistasia recessiva. **(Tab. 4.3)**

A cor aguti resulta do fato de os pêlos serem pretos com extremidades amarelas, e o alelo ***P*** é o responsável por esse traço. Se o camundongo for homozigótico recessivo (***pp***), seus pêlos não terão pontas amarelas e a pelagem será totalmente preta.

TABELA 4.3 • Genótipos e fenótipos na cor da pelagem em camundongos

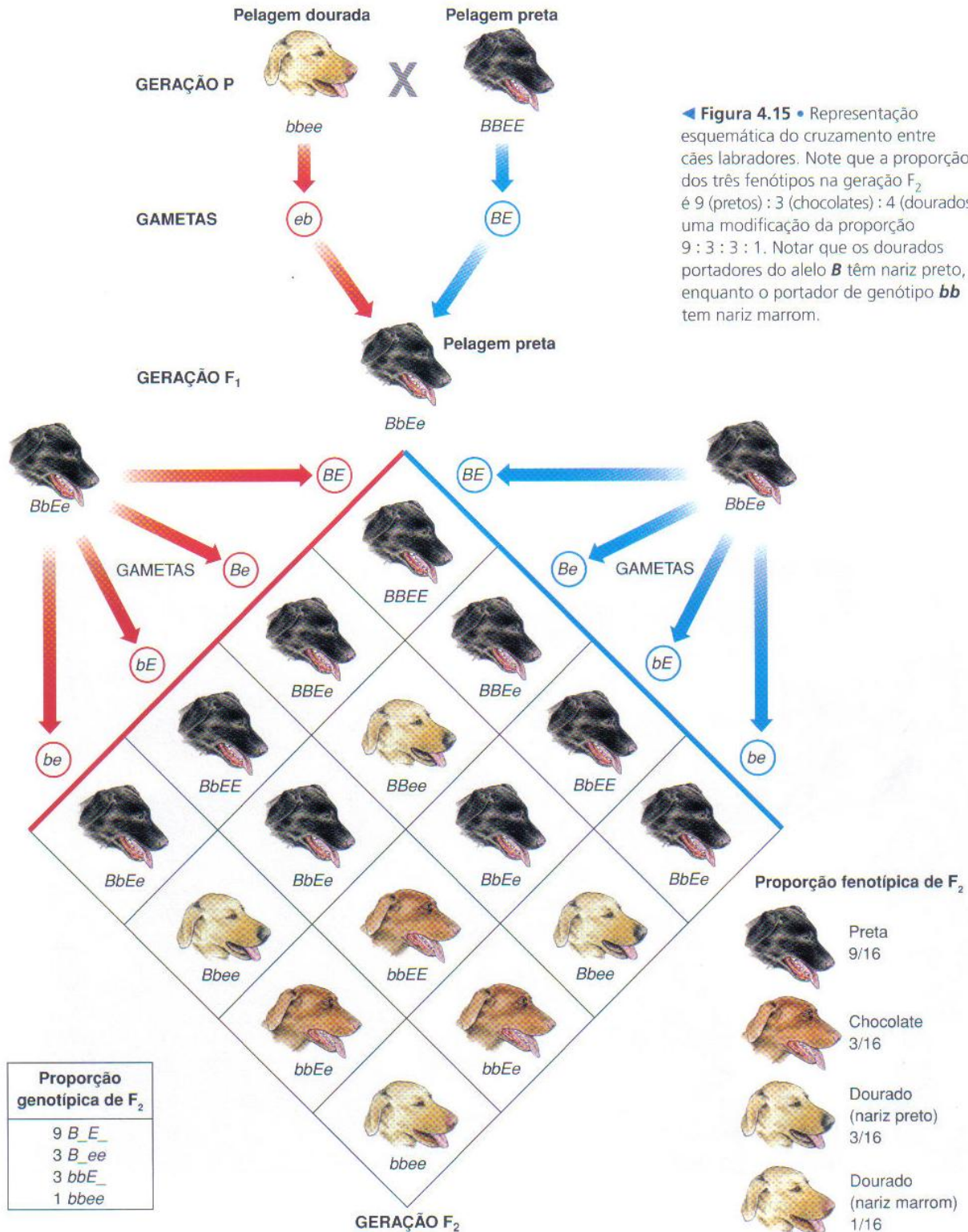
Genótipos	Fenótipos
A_P_	Aguti
A_pp	Preto
aaP_	Albino
aapp	Albino

A formação de qualquer pigmento no pêlo depende da presença do alelo ***A***, responsável pela produção de uma enzima necessária para a fabricação dos precursores de pigmento. Basta ter um alelo ***A*** no genótipo para que a coloração seja produzida. O alelo recessivo ***a*** produz uma enzima alterada, inativa. Assim, se o camundongo for homozigótico recessivo (***aa***), nenhum pigmento será produzido e o animal será albino. **(Fig. 4.14)**

▲ **Figura 4.14** • Representação da seqüência de reações bioquímicas que levam à síntese do pigmento melanina no pêlo de camundongos aguti, preto e albino. Cada transformação química é controlada por uma enzima, fabricada por um gene específico.

Exemplo de epistasia recessiva em cães labradores

A pelagem dos cães é condicionada por mais de uma dezena de genes. Alguns deles são responsáveis pela determinação das variações típicas de cada raça canina. Nos cães labradores, por exemplo, apenas dois genes condicionam as três pelagens típicas dessa raça: preta, chocolate e dourada.

Observe, a seguir, cruzamentos entre linhagens de labradores que diferem quanto à cor da pelagem. **(Fig. 4.15)**

◄ **Figura 4.15** • Representação esquemática do cruzamento entre cães labradores. Note que a proporção dos três fenótipos na geração F_2 é 9 (pretos) : 3 (chocolates) : 4 (dourados), uma modificação da proporção 9 : 3 : 3 : 1. Notar que os dourados portadores do alelo ***B*** têm nariz preto, enquanto o portador de genótipo ***bb*** tem nariz marrom.

O alelo dominante ***B*** determina a produção de pigmento preto, e o alelo recessivo ***b*** determina a produção de pigmento marrom. O outro gene envolvido na determinação da cor da pelagem dos labradores controla a deposição dos pigmentos nos pêlos. O alelo dominante ***E*** condiciona a deposição de pigmentos nos pêlos, enquanto o alelo recessivo ***e*** não condiciona essa deposição, atuando como epistático recessivo sobre ***B/b***.

Um cachorro homozigótico recessivo ***ee*** não tem pigmentos nos pêlos e sua pelagem é dourada. Animais com ao menos um alelo dominante desse gene, com genótipos ***EE*** ou ***Ee***, têm pêlos pigmentados, cuja cor depende do tipo de pigmento que o animal produz. A pelagem é preta se o cão apresenta ao menos um alelo dominante do gene ***B*** (***BB*** ou ***Bb***), ou marrom, se ele é homozigótico recessivo ***bb***. **(Fig. 4.16)**

O cruzamento de cães pretos de genótipo ***BBEE*** com cães dourados de genótipo ***bbee*** produz, em F_1, apenas cães pretos (***BbEe***). O cruzamento desses cães pretos duplo-heterozigóticos (***BbEe***) produz descendentes pretos (***B_E_***), cor de chocolate (***bbE_***) e dourados (***__ee***) na proporção de 9 : 3 : 4, respectivamente.

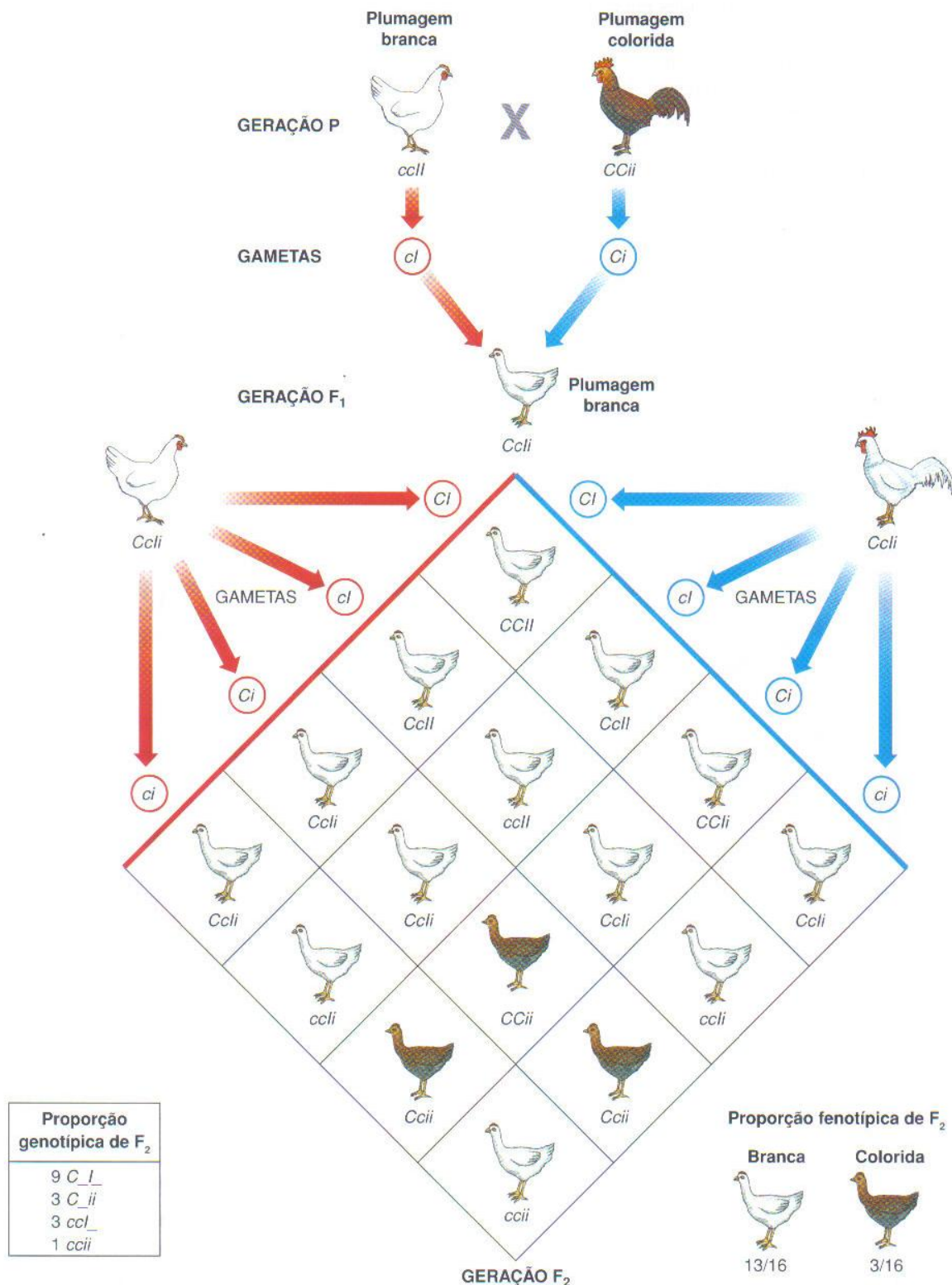
Os cães dourados descendentes do cruzamento entre labradores duplo-heterozigóticos podem ter genótipos ***BBee*** (1/4), ***Bbee*** (2/4) ou ***bbee*** (1/4). Destes, os que possuem o alelo ***B*** produzem pigmento preto, mas que não se deposita no pêlo por serem ***ee***; seus lábios e nariz são pretos, pois o alelo ***e*** não interfere na produção de pigmento nas células epidérmicas dessas estruturas. Os cães dourados homozigóticos ***bb*** produzem pigmento marrom em vez de preto e que se deposita nos lábios e nariz; por isso, estas partes são marrons. Assim, dos 4/16 de descendentes dourados, 3/16 têm lábios e nariz pretos e 1/16 tem lábios e nariz marrom.

Exemplo de epistasia dominante

Em galinhas, o alelo ***C*** condiciona plumagem colorida, enquanto o alelo ***c*** condiciona plumagem branca. Esses alelos interagem com os alelos de outro par (***I/i***) de tal maneira que, para ter plumagem colorida, a ave não pode apresentar o alelo ***I*** em seu genótipo.

Assim, apenas as aves de genótipo ***C_ii*** são coloridas. Aves ***ccii*** são brancas por não apresentarem o alelo para pigmentação (***C***) e aves ***C_I_*** são brancas porque o alelo ***I*** impede a pigmentação. Portanto, o gene epistático ***I*** atua em dose simples, comportando-se como se fosse dominante. Por isso, esse tipo de interação gênica e conhecido como epistasia dominante.

▲ **Figura 4.16** • Os três tipos de pelagem de cães labradores, da esquerda para a direita: dourada, chocolate e preta.

Quando se cruzam galinhas brancas duplo-heterozigóticas ***CcIi***, a descendência é constituída pela proporção de 13 aves brancas : 3 aves coloridas. As aves brancas apresentam os seguintes genótipos: ***C_I_***, ***ccI_*** e ***ccii***. As aves coloridas têm genótipos ***C_ii***. **(Fig. 4.17)**

▲ **Figura 4.17** • Representação do cruzamento de galináceos em que a proporção fenotípica de F_2 é 13 : 3. As classes resultantes da epistasia (9/16 ***C_I_*** + 3/16 ***ccI_*** = 12/16) são brancas, somando-se com o fenótipo da classe ***ccii***, que é branca pelo fato de o par hipostático ***cc*** não produzir pigmentos.

Outros tipos de interação gênica

O cruzamento entre duas variedades puras de ervilha-doce (*Lathyrus odoratus*), ambas possuidoras de flores brancas, produz uma geração F_1 inteiramente constituída por plantas com flores coloridas. Em um experimento, por exemplo, a autofecundação das plantas de F_1 produziu uma geração F_2 constituída por 382 plantas de flores coloridas e 269 plantas de flores brancas. Esses números correspondem à proporção de **9 : 7**, isto é, 9/16 das plantas apresentam flores coloridas e 7/16 apresentam flores brancas.

A fração com denominador 16, como já vimos, indica que a cor das flores da ervilha é condicionada por dois genes. Para ter flor colorida, a planta precisa apresentar ao menos um alelo dominante de cada gene (***A_B_***), o que corresponde à fração de 9/16 da descendência. Conseqüentemente, os genótipos ***aa__*** (3/16), ***__bb*** (3/16) e ***aabb*** (1/16) produzem flores brancas, resultando no total 7/16. **(Fig. 4.18) (Tab. 4.4)**

Figura 4.18 • Na ervilha-doce, a coloração das flores depende da interação de dois pares de alelos que se segregam independentemente. Do cruzamento entre plantas duplo-heterozigóticas surge a proporção 9 : 7 (9 descendentes de cor púrpura para 7 de cor branca).

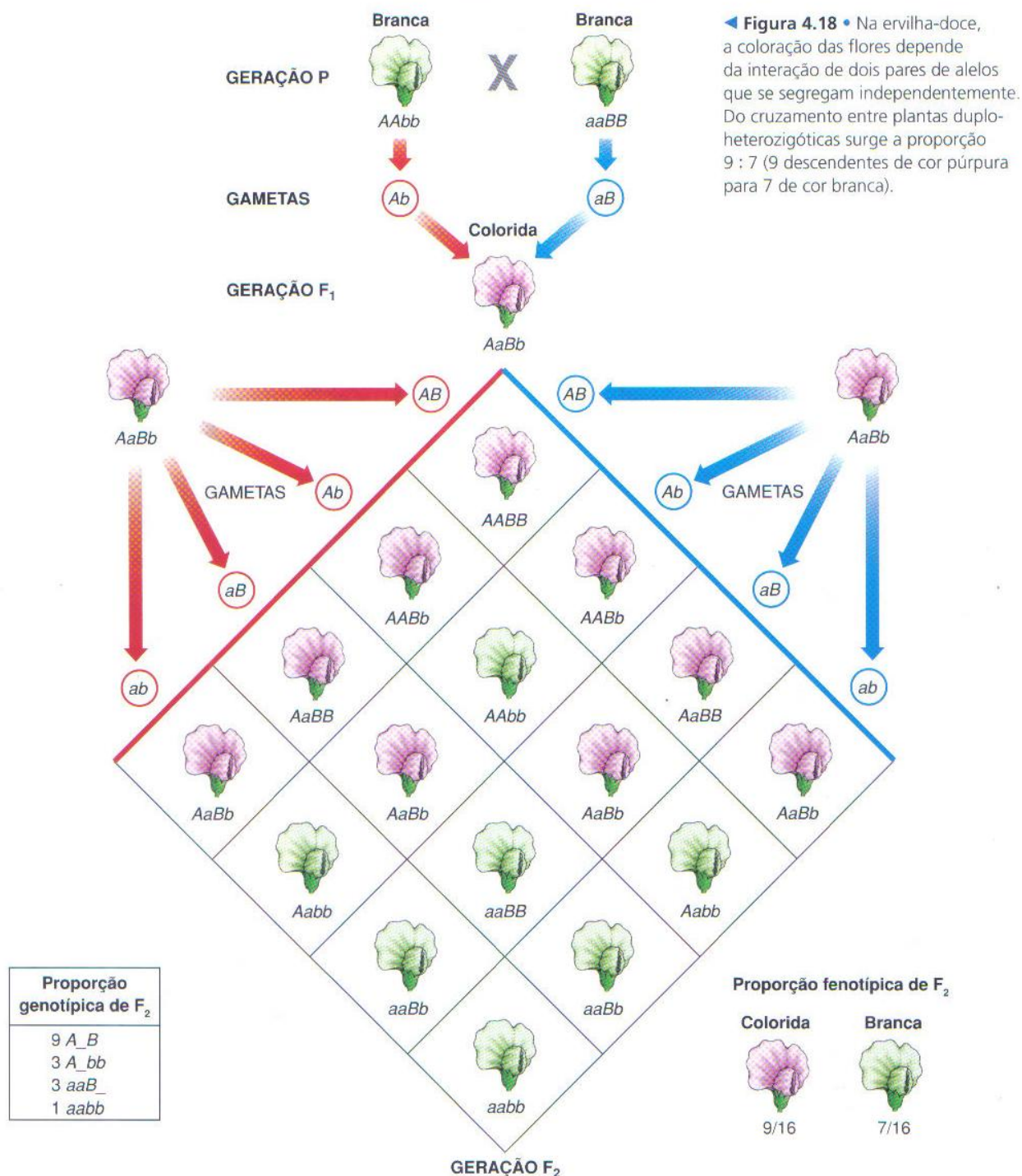



TABELA 4.4 • Alguns tipos de interação gênica

<table>
<tr><th rowspan="2">Tipo de interação</th><th colspan="4">Genótipos</th></tr>
<tr><th>A_B_</th><th>A_bb</th><th>aaB_</th><th>aabb</th></tr>
<tr><td>Proporção clássica</td><td>9</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Epistasia dominante</td><td colspan="2">12</td><td>3</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Epistasia recessiva</td><td>9</td><td>3</td><td colspan="2">4</td></tr>
<tr><td>Genes duplos com efeito cumulativo</td><td>9</td><td colspan="2">6</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Genes duplos dominantes</td><td colspan="3">15</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Genes duplos recessivos</td><td>9</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>Interação dominante e recessiva</td><td colspan="2">13</td><td>3</td><td></td></tr>
</table>

QUADRO 4.2 • Resolução de problema: interação gênica

O problema

Em abóboras, a forma do fruto pode ser discóide, esférica ou alongada. Uma variedade pura de frutos discóides foi cruzada com uma variedade pura de frutos alongados. A geração F_1 foi inteiramente constituída por plantas de frutos discóides.

Pergunta-se: se a autofecundação das plantas de F_1 produziu 80 descendentes, dos quais 30 de frutos esféricos, 5 de frutos alongados e 45 de frutos discóides, como se explica a herança da forma do fruto?

A solução

Poderíamos pensar, inicialmente, que a forma do fruto é controlada por um par de alelos com dominância incompleta. Se fosse esse o caso, deveríamos encontrar, em F_2, uma proporção fenotípica de 1 : 2 : 1, o que não ocorreu.

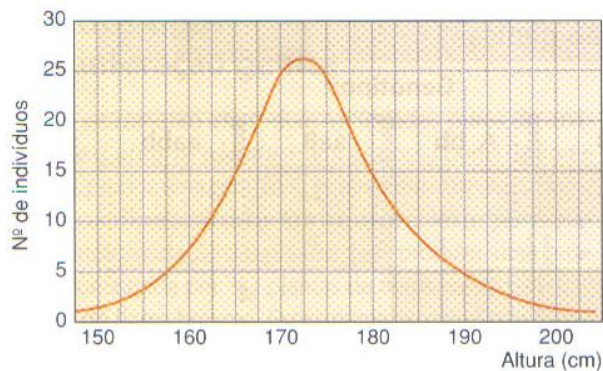
Dividindo os números de descendentes de cada classe fenotípica de F_2 pelo número da classe menor (neste caso, 5), temos: 45/5 = 9 discóides, 30/5 = 6 esféricos e 5/5 = 1 alongado.

Se interpretarmos a proporção 9 : 6 : 1 como uma modificação da proporção 9 : 3 : 3 : 1 (veja a tabela 4.4), concluiremos que basta um gene dominante em cada par (9/16 ***A_B_***) para que o fruto seja discóide. Plantas com um dos pares na condição homozigótica recessiva (3/16 ***aa__*** ou 3/16 ***__bb***) manifestam o mesmo fenótipo: fruto esférico. Plantas duplo-homozigóticas recessivas têm frutos alongados. ■

Herança quantitativa ou poligênica

Muitas características dos seres vivos, tais como altura, peso, cor etc., resultam do efeito cumulativo de muitos genes, cada um contribuindo com uma parcela no fenótipo. Por exemplo, pessoas em que há maior número de alelos para altura são mais altas que pessoas que apresentam menor número desses alelos. Essa herança, em que participam dois ou mais pares de genes, com ou sem segregação independente, é denominada **herança quantitativa** ou **poligênica**.

As características com herança poligênica, além do grande número de genótipos possíveis, sofrem forte influência do ambiente, o que aumenta ainda mais a gama de variação fenotípica. Com relação à estatura, por exemplo, existem desde pessoas muito altas até pessoas muito baixas, passando por um grande número de estaturas intermediárias. Essa característica também sofre forte influência ambiental; duas pessoas com mesmo genótipo podem ter alturas diferentes em conseqüência, por exemplo, do tipo de alimentação ou do grau do exercício físico que tiveram durante a fase de crescimento.

Se fizermos um gráfico da distribuição das estaturas nas pessoas de uma população, obteremos uma curva em forma de sino, conhecida como curva de distribuição normal. **(Fig. 4.19)**

▲ **Figura 4.19** • Características condicionadas por muitos genes, cuja expressão sofre influência ambiental, geralmente distribuem-se em uma curva normal. Esta tem forma de sino, com a estatura média situada no centro da curva, onde se concentra o maior número de pessoas da população.

Herança da cor da semente no trigo

Inicialmente, os pesquisadores tiveram dificuldade para entender a herança das características quantitativas. Muitos chegaram a imaginar que as leis descobertas por Mendel não se aplicavam nesses casos. Em 1910, no entanto, o geneticista sueco Herman Nilsson-Ehle (1873-1949), estudando a herança da cor do grão de trigo, estabeleceu os princípios da herança dos caracteres quantitativos. Nilsson-Ehle mostrou que a herança quantitativa segue as leis mendelianas e que os fenótipos são condicionados por diversos genes, cujos alelos têm efeito aditivo.

Em seu experimento, Nilsson-Ehle cruzou linhagens puras de trigo de sementes vermelho-escuras com linhagens puras de sementes brancas. A geração F_1 foi inteiramente constituída por plantas de sementes de cor vermelha mais clara que as do tipo parental.

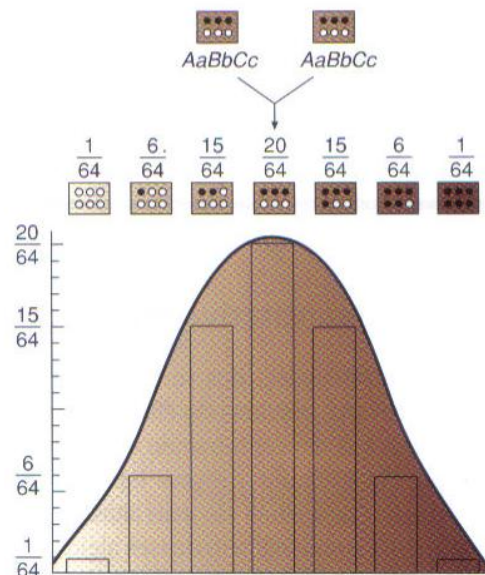
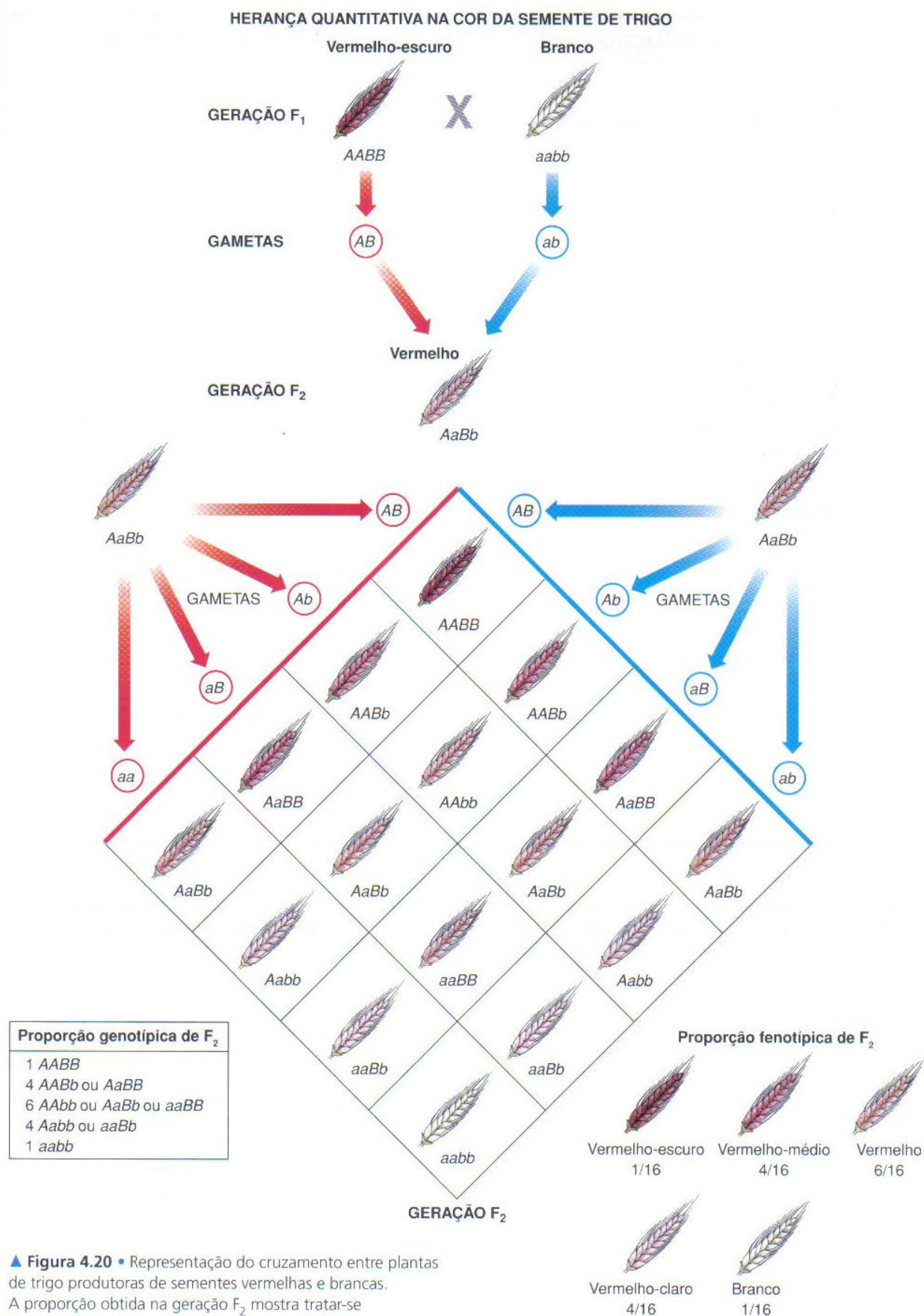
A autofecundação das plantas de F_1 produziu uma geração F_2 constituída por sementes de várias cores, que Nilsson-Ehle classificou em cinco categorias: vermelho-escura, vermelho-média, vermelha, vermelho-clara e branca. Esses diversos fenótipos ocorreram, respectivamente, na proporção de 1 : 4 : 6 : 4 : 1.

Esses resultados foram explicados admitindo-se que o caráter "cor da semente" é condicionado por dois genes, cada um com dois alelos (***A***/***a*** e ***B***/***b***), que se segregam independentemente.

Cada alelo representado pela letra maiúscula contribui para a produção de pigmento vermelho, e seus efeitos se somam. Os alelos representados por letras minúsculas não contribuem para a coloração da semente. Assim, uma semente portadora de quatro alelos para vermelho no genótipo (***AABB***) tem coloração vermelho-escura, enquanto uma semente sem alelos para vermelho (***aabb***) não tem pigmento, sendo branca. Sementes portadoras de um, dois e três alelos para pigmentação têm cores, respectivamente, vermelho-clara, vermelha e vermelho-média. **(Fig. 4.20**, na página seguinte**)**

A quantidade de fenótipos diferentes, nos casos de herança quantitativa, segue esta expressão: **número de alelos + 1**. Por exemplo, se houver 4 alelos envolvidos, como no caso da cor da semente do trigo, o número de classes fenotípicas será 5; se houver 6 alelos, haverá 7 classes fenotípicas, e assim por diante. Inversamente, para estimar o número de alelos envolvidos na herança poligênica, basta subtrair 1 do número de classes fenotípicas.

Herança da cor da pele na espécie humana

O modelo mais simples para explicar a herança da cor da pele na espécie humana classifica as pessoas em cinco fenótipos básicos: negro, mulato-escuro, mulato-médio, mulato-claro e branco. Essas cinco classes fenotípicas seriam controladas por dois genes, cada um com dois alelos (***Aa*** e ***Bb***). Um dos alelos de cada par seria mais ativo na produção de melanina, sendo por isso representado pelas letras maiúsculas ***A*** e ***B***; o outro alelo, menos ativo na produção de melanina, é representado pelas letras minúsculas ***a*** e ***b***. Outros modelos admitem a existência de pelo menos três genes de efeito aditivo, o que produziria não cinco, mas sete diferentes classes fenotípicas. Os filhos de pessoas de pele muito clara (***aabbcc***) com pessoas de pele muito escura (***AABBCC***) teriam pele de coloração intermediária (***AaBbCc***). Os descendentes de indivíduos com esse genótipo poderiam ser de sete tipos com probabilidades nas proporções indicadas. **(Fig. 4.21)**

▲ **Figura 4.21** • Representação esquemática da herança poligênica da cor da pele humana baseada em um modelo de três genes cada um deles com dois alelos, um determinante da presença de muita melanina (letra maiúscula) e outro, de pouca melanina (letra minúscula), nas células epidérmicas.

▲ **Figura 4.20** • Representação do cruzamento entre plantas de trigo produtoras de sementes vermelhas e brancas. A proporção obtida na geração F_2 mostra tratar-se de um caso de herança quantitativa ou poligênica.

QUADRO 4.3 • Resolução de problema: herança quantitativa

O problema

Em uma variedade de cevada, o tamanho médio dos entrenós do caule é de 3,2 cm. Em outra variedade, mais baixa, os entrenós têm, em média, 2,1 cm.

Um cruzamento entre essas duas variedades produziu uma geração F_1 constituída por plantas de altura intermediária à das plantas parentais, com entrenós, em média, de 2,65 cm.

A autofecundação das plantas de F_1 produziu uma geração F_2 constituída por plantas de diferentes alturas, das quais 1/16 tinha entrenós de 3,2 cm, como um dos pais, e 1/16 tinha entrenós de 2,1 cm, como o outro tipo parental.

Qual é o número provável de genes envolvidos no comprimento dos entrenós dessas duas linhagens de cevada e a contribuição de cada alelo para o fenótipo final?

A solução

A fração 1/16 para os fenótipos extremos indica tratar-se de uma característica condicionada por dois pares de alelos com segregação independente.

Se a diferença entre os tamanhos máximo e mínimo do entrenó é de 1,1 cm (3,2 cm − 2,1 cm) e há 4 alelos envolvidos, cada alelo "dominante" acrescenta 0,275 cm (1,1 ÷ 4) ao tamanho básico do entrenó. ■

TABELA A

Geração P	***AABB*** (3,2 cm)			***aabb*** (2,1 cm)	
Geração F_1			100% ***AaBb***		
Geração F_2	1/16 ***AABB***	2/16 ***AABb*** 2/16 ***AaBB***	1/16 ***AAbb*** 4/16 ***AaBb*** 1/16 ***aaBB***	2/16 ***Aabb*** 2/16 ***aaBb***	1/16 ***aabb***
	1/16	**4/16**	**6/16**	**4/16**	**1/16**

TABELA B

Genótipos de F_2	Fenótipos (tamanho do entrenó em cm)
AABB	3,2
AABb ou ***AaBB***	2,925
AAbb, ***AaBb*** ou ***aaBB***	2,650
Aabb ou ***aaBb***	2,375
aabb	2,1

QUADRO 4.4 • Genética da cor dos olhos na espécie humana

O primeiro modelo para explicar a herança da cor do olho na espécie humana, proposto em 1907, admitia a existência de um único gene com dois alelos, um dominante, responsável pela cor preta ou castanha, e outro recessivo, responsável pela cor azul. Esse modelo é claramente insatisfatório, pois não explica as diversas colorações intermediárias que a íris humana pode apresentar nem os casos de herança dessas colorações.

Origem das diferentes cores de olhos

A cor da íris do olho humano varia do cinza e azul-claro ao quase negro, passando pelo verde e por algumas tonalidades de castanho. Não há pigmentos azuis ou verdes na íris, e as diversas cores de olhos são produzidas pela presença de diferentes quantidades de melanina, um pigmento marrom-amarelado, e por efeitos ópticos.

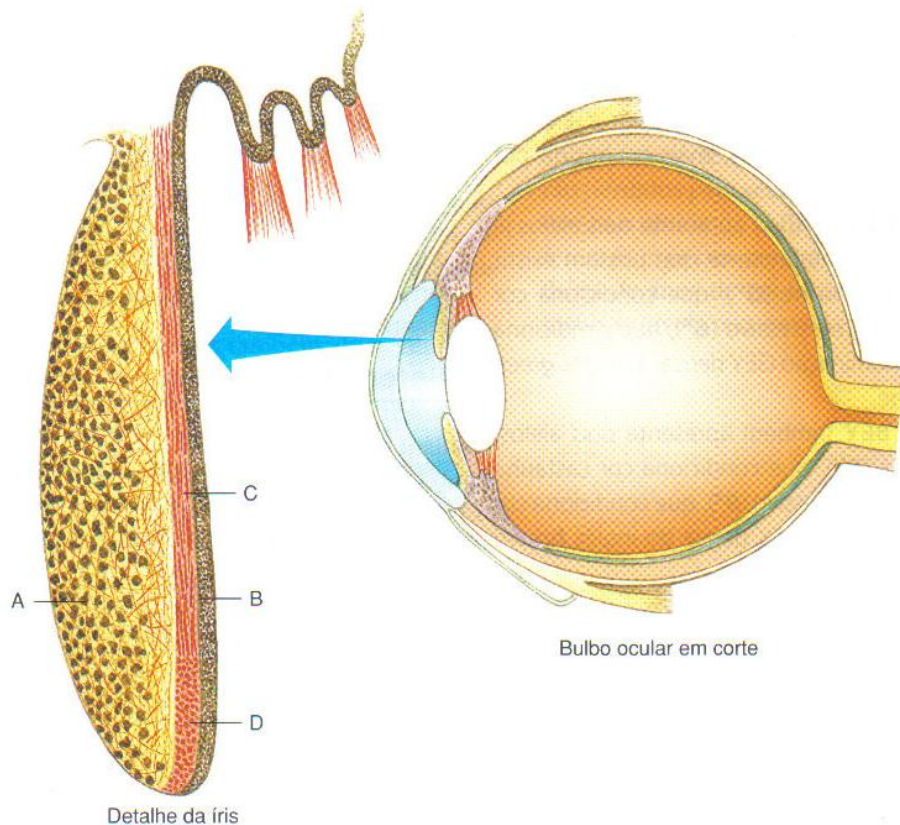
O olho escuro, por exemplo, resulta do acúmulo de células pigmentadas (ricas em melanina) na camada de tecido da porção anterior da íris. Essas células absorvem a maior parte da luz incidente, refletindo uma certa quantidade de luz marrom-amarelada.

O resultado é a cor castanho-escura da íris.

Nos olhos claros, a quantidade de células pigmentadas (melanócitos) na camada anterior da íris é muito reduzida, e apenas uma parte da luz

→

incidente é refletida como luz marrom-amarelada pelo pigmento. A maior parte da luz incidente atravessa a camada despigmentada da íris, onde os comprimentos de onda mais curtos (luz azul) são seletivamente refletidos, fenômeno conhecido como "dispersão Rayleigh". É justamente esse efeito óptico o responsável pela predominância do azul na luz refletida por uma íris desprovida de melanina na camada anterior. **(Fig. 4.22)**

No caso de a camada anterior da íris conter uma quantidade intermediária de melanina, a luz refletida pelo pigmento de cor marrom-amarelada, combinada com a luz azul produzida pelo efeito Rayleigh, resultará na cor verde da íris. Assim, uma progressiva diminuição da quantidade de melanina na camada anterior da íris produz a gradação de cores desde o castanho-escuro até o verde e, finalmente, na quase ausência do pigmento, do azul ao

▲ **Figura 4.22** • As fotos mostram íris humanas de três cores (castanho, verde e azul), que resultam tanto da distribuição do pigmento melanina na íris quanto de efeitos ópticos. **B.** Esquema de um corte transversal de metade de uma íris humana mostrando a camada anterior com células pigmentadas imersas em tecido conjuntivo (A), o epitélio pigmentado posterior (B), a musculatura radial dilatadora (C), a musculatura circular constritora (D).

→

cinza. Essa é a explicação para as diversas cores de olhos na espécie humana.

Os recém-nascidos de etnia caucasiana apresentam sempre olhos claros, que podem se tornar progressivamente mais escuros à medida que os melanócitos da íris produzem melanina. Os recém-nascidos latinos e de etnias negróide e asiática já apresentam olhos escuros ao nascer.

Não devemos nos esquecer que a íris não tem estrutura e coloração uniforme; nos olhos claros, a camada anterior é mais fina em certas regiões do que em outras, o que resulta em um padrão radial característico. A melanina também não se distribui homogeneamente, gerando áreas mais pigmentadas e áreas de menor pigmentação. Não é de estranhar, portanto, a dificuldade de classificar com precisão as cores dos olhos humanos e analisar o padrão de herança dessa característica.

Os genes envolvidos na determinação da cor dos olhos

Os cientistas identificaram dois genes envolvidos na determinação da cor dos olhos na espécie humana, que atuam na produção de melanina: o gene EYCL1, mais conhecido por GEY, no cromossomo 19, e o EYCL3, mais conhecido por BEY, no cromossomo 15.

O gene **GEY** (EYCL1) apresenta dois alelos já bem caracterizados (admite-se que possam existir outros), um dominante (G^V), que condiciona cor verde à íris, e outro recessivo (G^A), que condiciona cor azul. A denominação GEY deriva do inglês ***g**reen* ***e**y**e** color gene*.

O gene **BEY** também apresenta dois alelos, um dominante (B^M), que condiciona cor castanha (marrom), e outro recessivo (B^A), que condiciona cor azul. A denominação BEY deriva do inglês ***b**rown* ***e**y**e** color gene*.

Com base na identificação desses genes e no estudo de certos padrões de herança da cor dos olhos em algumas famílias, os pesquisadores concluíram que esses dois genes apresentam interação, sendo que o alelo para marrom do BEY (B^M) atua como epistático dominante sobre o gene GEY. De acordo com esse modelo, a pessoa portadora de pelo menos um alelo B^M terá olhos castanhos. Para ter olhos azuis, a pessoa precisa ser homozigótica recessiva quanto aos dois genes B^AB^A/G^AG^A. As pessoas terão olhos verdes se forem homozigóticas recessivas quanto ao gene BEY e tiverem, pelo menos, um alelo para verde do gene GEY ($B^AB^A/G^V_$). **(Tab. 4.5)**

TABELA 4.5 • Genótipos e fenótipos quanto aos genes BEY e GEY para cor de olhos

Genótipos	Fenótipos
B^MB^M/G^VG^V, B^MB^M/G^VG^A, B^MB^M/G^AG^A B^MB^A/G^VG^V, B^MB^A/G^VG^A, B^MB^A/G^AG^A	Olhos castanhos
B^AB^A/G^VG^V, B^AB^A/G^VG^A	Olhos verdes
B^AB^A/G^AG^A	Olhos azuis

Já foi identificado um terceiro gene, EYCL2 ou BEY1, também no cromossomo 15, que contribui para a cor castanha. Os cientistas acreditam que podem existir outros genes, que modificam a ação dos já identificados, mas o modelo em vigor até o presente é este que acabamos de ver e que envolve o GEY e o BEY2.

Esse modelo, que substitui o anterior, em que se admitia herança quantitativa com dois genes de efeitos aditivos, não explica as outras cores de olhos existentes na população nem como certos casais de olhos azuis geram filhos de olhos castanhos, um fato raro, mas que pode acontecer. Assim, apesar de todos os avanços da ciência em relação ao genoma humano ocorrido nos últimos anos, a herança da cor dos olhos ainda não está completamente explicada.

Heterocromia

Heterocromia da íris é o termo usado para designar a situação em que uma pessoa tem olhos de cores diferentes, por exemplo, um olho castanho e outro azul, ou regiões de cores diversas no mesmo olho. Existem várias causas para a heterocromia, mas em geral ela resulta de um desenvolvimento anormal dos melanócitos na camada anterior da íris, o que, como vimos, torna o olho claro. Os melanócitos necessitam de impulsos nervosos para sobreviver, e se, por alguma razão, o estímulo nervoso ao olho ou a uma região da íris for interrompido, a cor mudará. Existem também genes de expressividade variável que podem ser ativados em apenas um olho, ou até mesmo em áreas restritas de uma íris, impedindo a síntese de melanina e tornando o olho, ou a área afetada, azul.

LEITURA

Reflexões sobre diversidade genética e bem-estar humano

A Genética teve início em um mosteiro, há pouco mais de um século, e hoje tem importância crucial para a humanidade, desempenhando papéis que vão desde testes de paternidade até o melhoramento de plantas, passando pela utilização de fontes alternativas de energia e a prevenção de doenças hereditárias. Por exemplo, praticamente todo o milho que se produz hoje nos Estados Unidos é "híbrido", resultante de cruzamentos dirigidos entre linhagens que, individualmente, não produzem espigas e grãos de boa qualidade.

O aumento da população mundial, com o conseqüente aumento da necessidade de alimentos, tem levado os geneticistas a desenvolver novas linhagens de plantas e de animais que produzam mais com menor quantidade de energia, trabalho e dinheiro.

O melhoramento pode empregar diferentes estratégias. Uma delas é selecionar características desejáveis, já presentes em alguns indivíduos da população.

Pode-se tentar, também, criar genes de interesse em laboratório, induzindo a ocorrência de mutações. Na prática, os resultados ainda são pouco expressivos, principalmente porque as características de valor comercial são, geralmente, resultantes da interação de muitos genes.

Uma terceira estratégia é procurar características de interesse em populações selvagens de uma determinada espécie, ou mesmo em espécies aparentadas. Essa estratégia é promissora, e foi assim que as antigas civilizações desenvolveram as variedades domésticas de plantas e animais utilizadas até hoje. O trigo, por exemplo, foi resultado de cruzamentos entre capins selvagens que, por irregularidades na meiose, originaram plantas poliplóides produtoras de sementes comestíveis.

Em 1979, os biólogos Rafael Guzman e Hugh Iltis descobriram um tipo de gramínea em uma área montanhosa do México e concluíram ser um tipo de milho primitivo. Enquanto o milho cultivado é uma planta anual, a espécie selvagem é perene. Os pesquisadores esperam obter, de cruzamentos entre milho cultivado e selvagem, variedades que reúnam características úteis de ambos. Se um agricultor pudesse, por exemplo, plantar milho apenas uma vez a cada 5 ou 10 anos, colhendo as sementes continuamente, haveria uma enorme economia de energia, trabalho e dinheiro.

Uma importante razão para preservar os ambientes naturais é a preservação dos genes dos animais e das plantas que neles vivem. Se uma espécie se extinguir, seus genes serão perdidos para sempre. Com todos os seus diversos alelos, os conjuntos gênicos das diferentes espécies resultam de milhões e milhões de anos de evolução, e são valiosos e insubstituíveis recursos da natureza.

- **Fonte:** Gerald Audesirk e Teresa Audesirk. *Biology: life on Earth*. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1986. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

4.1 O conceito de segregação independente

1. Quais foram os resultados obtidos por Mendel na geração F_2 do cruzamento de ervilhas amarelas-lisas e verdes-rugosas?

2. Que tipos de gameta e em que proporção são formados por um organismo duplo-heterozigótico *VvRr*, cujos genes segregam-se independentemente?

3. Qual é o enunciado da segunda lei de Mendel?

4. Qual é a relação entre a segregação independente dos cromossomos homólogos na meiose e a segregação independente dos genes?

5. Quais são as proporções fenotípicas esperadas na geração F_2 do cruzamento entre ervilhas homozigóticas amarelas-lisas-cinza e verdes-rugosas-brancas, tendo em vista que os genes condicionantes dessas três características segregam-se independentemente?

6. Admitindo-se a segregação independente, calcule quantos tipos de gameta produz cada um dos indivíduos portadores dos genótipos: a) *AaBbCCdd*; b) *AaBb*; c) *AAbbCCDDEEFf*.

4.2 Interações de genes não-alelos

7. Conceitue interação gênica.

8. Explique como ocorre o controle genético das quatro cores básicas da plumagem em periquitos australianos.

9. Explique como ocorre o controle genético dos quatro tipos de crista (rosa, ervilha, noz e simples) presentes em certas raças de galinhas domésticas.

10. Conceitue epistasia dominante e epistasia recessiva.

11. Explique como ocorre o controle genético das três cores básicas da pelagem dos cães labradores.

12. Sobre a herança da cor da pelagem em camundongos, um caso de epistasia recessiva, responda: como se explicam as proporções de 9 aguti : 3 pretos : 4 albinos na descendência de camundongos aguti heterozigóticos?

13. Explique resumidamente o mecanismo genético-bioquímico da epistasia recessiva na herança da cor da pelagem em camundongos.

14. Sobre a herança da cor da plumagem em galináceos, um caso de epistasia dominante, responda: como se explicam as proporções de 13 aves brancas para 3 aves coloridas no cruzamento entre galos e galinhas brancos duplo-heterozigóticos?

15. Como se explica a proporção de 9 : 7 de plantas com flores coloridas e com flores brancas, obtida por Bateson e sua equipe no cruzamento de plantas de ervilha-doce de flores coloridas duplo-heterozigóticas?

16. Caracterize herança quantitativa, ou poligênica, exemplificando.

17. Explique como se relacionam os genótipos e fenótipos na determinação da cor da semente de trigo, um caso de herança poligênica.

18. Explique como se relacionam os genótipos e fenótipos na determinação da cor da pele humana, admitindo o modelo de herança poligênica com dois genes.

Quadro 4.4 Genética da cor dos olhos na espécie humana

19. Como se explicam as diferentes cores de olhos na espécie humana, em termos da distribuição de pigmento nas camadas da íris?

20. Como os genes GEY e BEY atuam na determinação da cor do olho humano?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

21. Segundo a lei da segregação independente, ou segunda lei de Mendel:

a) dois ou mais genes determinam cada característica de um ser vivo.
b) o fenótipo resulta da interação entre o genótipo e o meio.
c) os organismos diplóides possuem duas cópias de cada gene.
d) a separação dos alelos de um gene na meiose não interfere na separação dos alelos de genes localizados em outros pares de cromossomos homólogos.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 22 e 23.

a) Co-dominância.
b) Herança quantitativa, ou poligênica.
c) Interação gênica.
d) Pleiotropia.

22. Que nome se dá ao fato de dois ou mais genes condicionarem conjuntamente uma determinada característica?

23. Qual é o nome da herança em que diversos genes atuam sobre determinada característica, cada um com um efeito aditivo na composição do fenótipo?

24. Uma célula duplo-heterozigótica quanto a dois pares de alelos, *Aa* e *Bb*, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos, formará por meiose quatro células, sendo

a) uma portadora de *A*, outra de *a*, outra de *B* e outra de *b*.
b) uma portadora de *AB*, outra de *Ab*, outra de *aB* e outra de *ab*.
c) uma portadora de *AA* , outra de *Ab*, outra de *aB* e outra de *aa*.
d) duas portadoras de *AB* e duas portadoras de *ab*, ou duas portadoras de *Ab* e duas portadoras de *aB*.

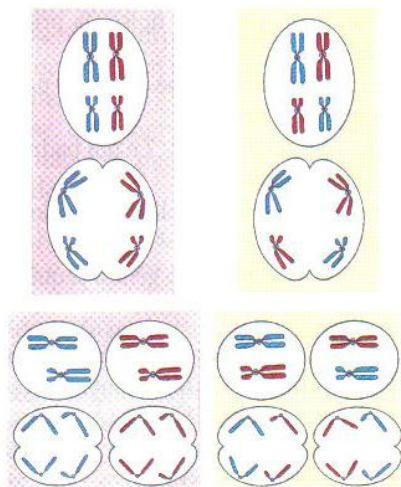
25. Um indivíduo multicelular duplo-heterozigótico quanto a dois pares de alelos, *Aa* e *Bb*, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos, forma gametas na proporção de

a) 1/4 *A* : 1/4 *a* : 1/4 *B* : 1/4 *b*.
b) 1/4 *AB* : 1/4 *Ab* : 1/4 *aB* : 1/4 *ab*.
c) 1/4 *AA* : 1/4 *Ab* : 1/4 *aB* : 1/4 *aa*.
d) 1/2 *AB* : 1/2 *ab*, ou 1/4 *Ab* : 1/4 *aB*.

26. No cruzamento entre indivíduos duplo-heterozigóticos quanto a dois pares de alelos, *Aa* e *Bb*, localizados em diferentes pares de cromossomos homólogos, espera-se obter

a) apenas indivíduos *AaBb*.
b) indivíduos *AB* e *ab* na proporção de 1 : 1.
c) indivíduos *AA*, *Ab*, *aA* e *bb*, na proporção de 9 : 3 : 3 : 1, respectivamente.
d) indivíduos *A_B_*, *A_bb*, *aaB_* e *aabb*, na proporção de 9 : 3 : 3 : 1, respectivamente.

QUESTÕES DISCURSIVAS

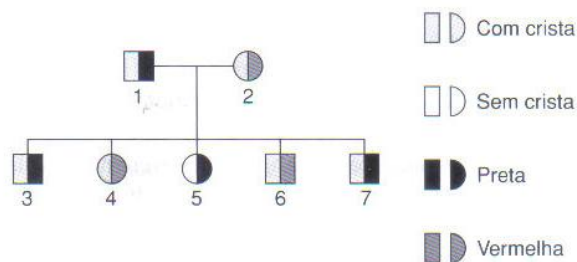
27. Nos esquemas abaixo, estão representadas algumas etapas da meiose de duas células de um indivíduo heterozigótico para dois pares de alelos (*AaBb*), localizados em dois pares de cromossomos homólogos. Sabendo-se que os alelos *Aa* estão localizados no par de cromossomos metacêntricos e que os alelos *Bb* localizam-se no par de cromossomos submetacêntricos.

a) Represente os dois tipos possíveis de segregação desses alelos.
b) Quantos tipos de gameta cada célula forma ao final da meiose?
c) Quantos tipos de gameta o indivíduo duplo-heterozigótico formará?
d) Por que os diversos tipos de gameta formados pelo indivíduo ocorrem na mesma freqüência?

28. A característica caule longo em ervilha é condicionada por um alelo (*B*) dominante em relação ao alelo (*b*) que condiciona caule curto. A cor verde da vagem é condicionada por alelo (*A*) dominante em relação ao alelo (*a*) que condiciona vagem de cor amarela. Do cruzamento de uma planta homozigótica de caule longo e vagem amarela com uma outra planta também homozigótica de caule curto e vagem verde resultou uma geração F_1. Indivíduos F_1 cruzados com uma planta de caule curto e vagem amarela produziram uma descendência assim constituída: 120 plantas de caule longo e vagem verde; 110 plantas de caule longo e vagem amarela; 119 plantas de caule curto e vagem verde; 111 plantas de caule curto e vagem amarela.

a) Faça um diagrama do último cruzamento, indicando o genótipo dos pais e dos descendentes.
b) Os dois genes têm segregação independente? Justifique.
c) Determine os tipos de gametas com as respectivas proporções de cada um dos tipos de plantas descendentes do último cruzamento.

29. Nos suínos existem cascos indivisos (*F_*) e cascos fendidos (*ff*). Outro loco, situado em outro par cromossômico, determina a cor dos pêlos, que pode ser branca (*P_*) ou preta (*pp*). Um porco branco e de cascos indivisos foi cruzado com porcas genotipicamente iguais entre si e fenotipicamente iguais a ele. Entre as várias ninhadas, foram vendidos apenas os porquinhos pretos de cascos fendidos, que eram em número de 9. Pergunta-se:

a) Quantos porquinhos espera-se que tenham nascido ao todo?
b) Quantos porquinhos, do total nascido nas ninhadas, espera-se que sejam genotipicamente idênticos ao pai, quanto aos genes aqui considerados?

30. Observe a árvore genealógica a seguir, para resolver os itens do problema.

Estão sendo consideradas, em galináceos, as características: presença de crista (C) e ausência de crista (*cc*), a cor das penas pode ser preta (*V*) ou vermelha (*v*). Na árvore genealógica, a metade esquerda dos indivíduos refere-se ao traço presença ou ausência de crista, enquanto o lado direito refere-se ao traço coloração das penas. Ocorre segregação independente entre esses dois lócus gênicos.

a) Determine os genótipos de todos os indivíduos.

b) Se cruzássemos o indivíduo 1 com o indivíduo 5, qual seria a proporção fenotípica da descendência?

31. Em galinha, o alelo dominante (*R*), que condiciona crista rosa, quando presente juntamente com o alelo dominante (*E*), que condiciona crista ervilha, leva à formação de um terceiro tipo de crista: crista noz. O homozigótico recessivo para ambos os pares de alelos (*rree*) apresenta crista simples. Com base nesses dados, responda:

a) Qual será o tipo de crista da descendência nos seguintes cruzamentos:

RrEe × *RrEe*; *RREe* × *rrEe*; *rrEE* × *RrEe*?

b) Um indivíduo de crista rosa cruzado com um de crista ervilha produziu 1/4 de descendentes com crista noz, 1/4 com crista rosa, 1/4 com crista ervilha e 1/4 com crista simples. Determine os genótipos dos pais.

c) Um indivíduo de crista noz cruzado com um de crista simples produziu: 1/4 de descendentes com crista noz, 1/4 com crista rosa, 1/4 com crista ervilha e 1/4 com crista simples. Determine os genótipos dos pais.

d) Um indivíduo de crista rosa cruzado com um de crista ervilha produziu seis indivíduos noz e cinco rosa. Determine os genótipos dos pais.

e) Dois indivíduos de crista noz quando cruzados produziram: um indivíduo rosa, dois noz e um simples. Determine os genótipos dos pais.

32. As flores do goiveiro podem ser brancas, vermelhas ou creme. A cor branca é condicionada por um alelo (*a*) que atua evitando a produção de qualquer pigmento na planta; o alelo dominante (*A*) condiciona a produção de pigmento, que pode ser vermelho ou creme, dependendo da constituição de um outro par de alelos. Nesse segundo par, o alelo dominante (C) determina que o pigmento seja de cor vermelha, enquanto o alelo recessivo (*c*) determina que o pigmento seja de cor creme.

a) Que proporções fenotípicas e genotípicas espera-se no cruzamento de plantas de flores vermelhas de genótipo *AaCc* com plantas de flores creme de genótipo *Aacc*?

b) No cruzamento de plantas de flores creme com plantas de flores vermelhas foram produzidas plantas de flores vermelhas e plantas de flores brancas; determine os prováveis genótipos dos pais.

33. Considere que a diferença entre uma planta de milho de 100 cm de altura e uma de 260 cm é devida a quatro pares de fatores de efeitos iguais e cumulativos, tendo a planta de 260 cm genótipo *AABBCCDD* e a de 100 cm, *aabbccdd*.

Qual será a altura e respectivo genótipo das plantas F_1 resultantes do cruzamento entre as duas linhagens puras?

34. Com base nas informações da questão anterior, calcule as alturas de cada indivíduo cujos genótipos são dados a seguir e determine em cada cruzamento quais serão as alturas do indivíduo mais alto e do indivíduo mais baixo produzidos.

a) *AaBBccdd* × *AabbCcdd*.

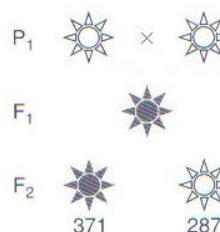
b) *aaBBccdd* × *aaBBccdd*.

c) *AaBbCcDd* × *AabbCcDd*.

d) *AABBCcDD* × *aaBBccDd*.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

35. (UFV) O esquema a seguir representa o cruzamento entre duas variedades puras de ervilha-de-cheiro (*'Lathyrus odoratus'*) de flor branca. A F_1 resultante apresentou 100% das ervilhas com flores avermelhadas. Após autofecundação das plantas F_1, foram produzidas 371 plantas com flores avermelhadas e 287 com flores brancas, na geração F_2.

Analise este padrão de herança e assinale a afirmativa CORRETA.

a) Trata-se de um exemplo típico da primeira lei de Mendel.

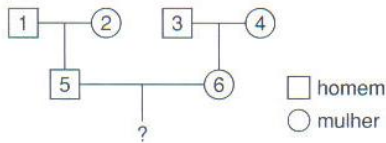
b) Pelos resultados, deduz-se que é um padrão de herança intermediária.

c) A proporção fenotípica 9 : 7 é um padrão de segregação independente.

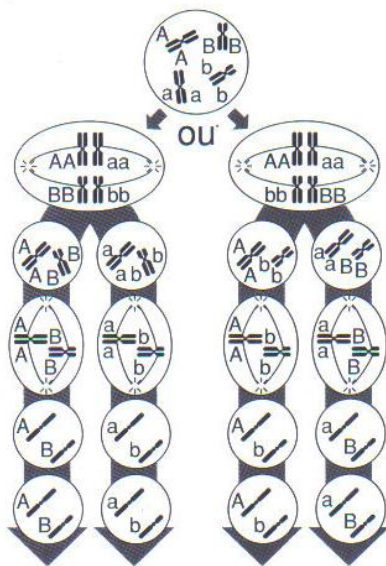
d) O gene para a cor avermelhada é co-dominante em relação ao alelo.

e) O exemplo é de interação gênica já que está envolvido apenas um loco.

36. (PUCSP) Foram analisadas, em uma família, duas características autossômicas dominantes com segregação independente: BRAQUIDACTILIA (dedos curtos) e PROGNATISMO MANDIBULAR (projeção da mandíbula para a frente).

As pessoas indicadas pelos números 1, 3, 5 e 6 são braquidáctilas e prognatas, enquanto 2 e 4 têm dedos e mandíbula normais.

A probabilidade de o casal 5 × 6 ter um descendente simultaneamente braquidáctilo e prognata é de

a) 1/16.
b) 3/16.
c) 9/16.
d) 3/4.
e) 1/4.

37. (UFSM)

AMABIS e MARTHO. "Fundamentos da Biologia Moderna". São Paulo: Moderna, 1997. p. 499.

A figura representa a:

a) mitose e explica a separação dos cromossomos durante a divisão.
b) meiose e explica a segregação independente dos genes previstos pela segunda lei de Mendel.
c) mitose e explica a segregação dos genes demonstrando a dominância e a recessividade.
d) meiose, que é um processo de formação de gametas, mas que não tem nenhuma relação com as leis de Mendel.
e) mitose, que é um processo de divisão celular mas que não tem nenhuma relação com as leis de Mendel.

38. (MACK) Em ervilhas, os genes que determinam sementes lisas e amarelas são dominantes em relação aos genes que determinam sementes rugosas e verdes. Considerando uma planta de sementes lisas e amarelas, diíbrida, assinale a alternativa que apresenta a porcentagem de gametas produzidos por essa planta com pelo menos um gene dominante.

a) zero
b) 75%
c) 50%
d) 12,5%
e) 25%

39. (UFAL) Em tomateiros, a cor do hipocótilo púrpura é condicionada por um alelo dominante e a cor verde, pelo alelo recessivo; a folha recortada é determinada por um alelo dominante e a lisa, pelo alelo recessivo. Esses genes estão localizados em cromossomos que se segregam independentemente. Através do intercruzamento de plantas duplo-heterozigóticas, foram obtidos 480 descendentes. Dentre esses, o número esperado de indivíduos com hipocótilo púrpura e folhas lisas é

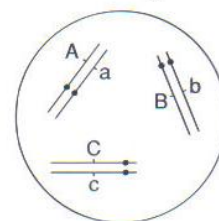
a) 30. b) 90. c) 160. d) 240. e) 270.

40. (UFLA) No milho, a textura da semente pode ser lisa devido ao alelo "Su" e rugosa devido ao alelo "su". A cor da semente pode ser amarela devido ao alelo "Y" e branca devido ao alelo "y". A planta pode ser alta devido ao alelo "Br" e baixa devido ao alelo "br".
Uma planta pura, alta, de semente lisa e amarela, foi cruzada com outra planta pura, baixa, de semente rugosa e branca. Na geração F_1, observaram-se 100% das plantas altas, de semente lisa e amarela. Se as plantas da geração F_1 forem intercruzadas, o número de gametas produzidos pelas plantas F_1 e a proporção fenotípica esperada na geração F_2 será, respectivamente,

a) 4 e 3 : 3 : 3 : 1 : 1 : 1.
b) 8 e 27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 1.
c) 8 e 9 : 3 : 3 : 1.
d) 16 e 9 : 3 : 3 : 1.
e) 16 e 27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 1.

41. (UFPI) Um organismo diplóide, com o genótipo AaBBCCDDEE, poderá produzir quantos tipos geneticamente distintos de gametas?

a) 2 b) 4 c) 8 d) 16 e) 32

42. (UFSCAR) Sessenta células de um animal, com a constituição representada na figura, sofrem meiose.

São esperados, apresentando a constituição ABC,

a) 30 espermatozóides.
b) 60 espermatozóides.
c) 90 espermatozóides.
d) 120 espermatozóides.
e) 180 espermatozóides.

43. (UFRS) Indivíduos com os genótipos AaBb, AaBB, AaBbCc, AaBBcc, AaBbcc podem formar, respectivamente, quantos tipos de gametas diferentes?

a) 4 - 4 - 8 - 8 - 8
b) 4 - 2 - 8 - 4 - 4
c) 2 - 4 -16 - 8 - 8
d) 4 - 2 - 8 - 2 - 4
e) 2 - 4 -16 - 4 – 8

44. (UEL) Considere quatro pares de genes que segregam de maneira independente. Nessas condições, um indivíduo que apresente o genótipo AaBBCcDD produzirá gametas ABCD com a freqüência de

a) 75%. b) 50%. c) 25%. d) 12%. e) 6,25%.

45. (PUCRS) A análise de 4 genes autossômicos, cada um com um par de alelos, permitiu constatar que Janaína tem o genótipo AAbbCCDD e Pedro tem o genótipo aaBBccDD. Para estes 4 genes, quantos tipos diferentes de gametas poderia produzir o filho de Janaína e Pedro?

a) 4 b) 8 c) 16 d) 32 e) 64

46. (UFAL) Em determinada raça animal, a cor preta é determinada pelo alelo dominante M e a marrom pelo alelo m, o alelo B condiciona padrão uniforme e o b, presença de manchas brancas. Esses dois pares de alelos autossômicos segregam-se independentemente. A partir do cruzamento Mmbb × mmBb, a probabilidade de nascer um filhote marrom com manchas é

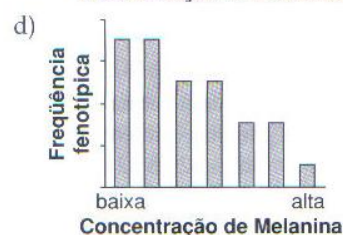
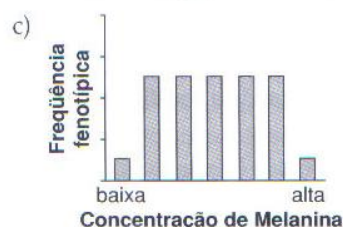
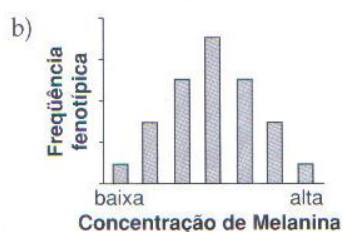
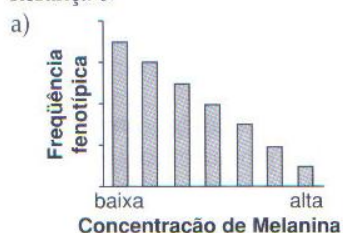
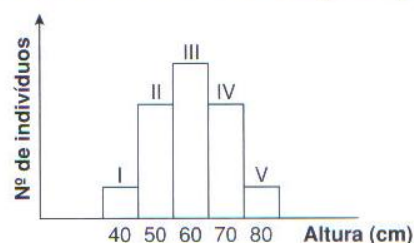
a) 1/16. b) 3/16. c) 1/4. d) 1/2. e) 3/4.

47. (UFRN) A cor da pele humana é conseqüência do efeito cumulativo de mais de um gene, de modo que cada gene contribui igualmente para o fenótipo. O gráfico que representa a proporção fenotípica nesse tipo de herança é:

a)

b)

c)

d)

48. (UEL) Em certa espécie vegetal, a altura dos indivíduos é determinada por dois pares de alelos de efeito aditivo e segregação independente: cada alelo P e R determina 20 cm de altura e cada alelo p e r determina 10 cm. Assim, os indivíduos PPRR têm 80 cm e os indivíduos pprr, 40 cm. O gráfico a seguir representa a distribuição das classes fenotípicas observada nos descendentes dos cruzamento entre heterozigotos PpRr.

Nesse gráfico, os indivíduos PPRr e Pprr estão incluídos, respectivamente, em

a) IV e V.
b) IV e II.
c) III e II.
d) III e I.
e) I e V.

49. (MACK)

Número de genes dominantes	Cor da semente
4	vermelho escuro
3	vermelho médio
2	vermelho
1	vermelho claro
nenhum	branco

A cor dos grãos de trigo é condicionada por dois pares de genes de efeito aditivo. A tabela acima mostra o número de genes dominantes e as cores determinadas por eles. Do cruzamento entre um indivíduo AaBb e um Aabb, a proporção esperada de indivíduos com grãos vermelhos é de

a) 3/8.
b) 1/8.
c) 3/16.
d) 6/8.
e) 5/8.

50. (PUCSP) Imagine que, em um determinado animal, a retenção de água no corpo seja controlada pela interação quantitativa de dois pares de genes, existindo cinco fenótipos (da retenção baixa até a retenção máxima de água).

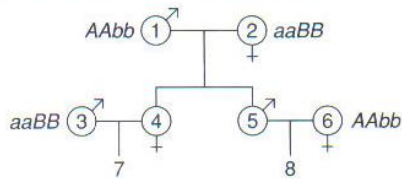
Animais com genótipo aabb retêm baixa quantidade de água, enquanto animais com genótipo AABB apresentam retenção máxima de água. Os animais que apresentam dois genes "maiúsculos" e dois genes "minúsculos" no genótipo retêm uma quantidade intermediária de água.

Na genealogia abaixo, são dados os genótipos dos animais indicados pelos números 1, 2, 3 e 6. Considerando que os genes em questão se segregam independentemente, qual a probabilidade de os indivíduos 7 e 8 apresentarem simultaneamente retenção intermediária de água?

AAbb (1) ♂ — (2) ♀ aaBB

aaBB (3) ♂ — (4) ♀ (5) ♂ — (6) ♀ AAbb

7 8

a) 1/2
b) 1/3
c) 1/4
d) 1/8
e) 1/16

51. (UNESP) A altura de uma certa espécie de planta é determinada por dois pares de genes A e B e seus respectivos alelos a e b. Os alelos A e B apresentam efeito aditivo e, quando presentes, cada alelo acrescenta à planta 0,15m. Verificou-se que plantas desta espécie variam de 1,00m a 1,60m de altura.

Cruzando-se plantas AaBB com aabb pode-se prever que, entre os descendentes,

a) 100% terão 1,30m de altura.
b) 75% terão 1,30m e 25% terão 1,45m de altura.
c) 25% terão 1,00m e 75% terão 1,60m de altura.
d) 50% terão 1,15m e 50% terão 1,30m de altura.
e) 25% terão 1,15m, 25% 1,30m, 25% 1,45m e 25% 1,60m de altura.

QUESTÕES DISCURSIVAS

52. (UFC) Observe a tabela a seguir, que mostra parte dos resultados dos experimentos de Mendel, realizados com ervilhas.

Caráter	Forma da semente	Cor da semente
Geração P (cruzamento entre duas plantas puras)	Lisa × Rugosa	Amarelo × Verde
Geração F_1	Todas lisas	Todas amarelas
Números obtidos na geração F_2 (originada da autofecundação de F_1)	5.474 lisas 1.850 rugosas	6.022 amarelas 2.001 verdes
Proporções reais obtidas em F_2	2,96 lisas : 1 rugosa	3,01 amarelas : 1 verde

De acordo com a tabela, responda:

a) Por que na geração F_1 não foram encontradas sementes rugosas ou verdes?
b) O que são os fatores hereditários referidos por Mendel e onde estão situados?
c) Faça um diagrama de cruzamento para exemplificar as proporções fenotípicas encontradas na geração F_2, utilizando qualquer uma das características apresentadas na tabela.

53. (UNICAMP) Considere duas linhagens homozigotas de plantas, uma com caule longo e frutos ovais e outra com caule curto e frutos redondos. Os genes para comprimento do caule e forma do fruto segregam-se independentemente. O alelo que determina caule longo é dominante, assim como o alelo para fruto redondo.

a) De que forma podem ser obtidas plantas com caule curto e frutos ovais a partir das linhagens originais? Explique indicando o(s) cruzamento(s). Utilize as letras A, a para comprimento do caule e B, b para forma dos frutos.
b) Em que proporção essas plantas de caule curto e frutos ovais serão obtidas?

54. (UNB) Em uma determinada espécie animal, foram analisadas duas características com segregação independente e herança co-dominante: cor e textura do pêlo. Para a cor do pêlo, os homozigotos podem ser vermelhos ou brancos. Para a textura, os homozigotos têm pêlo liso ou crespo. Calcule a porcentagem esperada de descendentes fêmeas com pêlo vermelho crespo oriundas do cruzamento de dois animais duplamente heterozigotos. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

55. (FUVEST) Em cobaias, a cor preta é condicionada pelo alelo dominante D e a cor marrom, pelo alelo recessivo d. Em um outro cromossomo, localiza-se o gene responsável pelo padrão da coloração: o alelo dominante M determina padrão uniforme (uma única cor) e o alelo recessivo m, o padrão malhado (preto / branco ou marrom / branco). O cruzamento de um macho de cor preta uniforme com uma fêmea de cor marrom uniforme produz uma ninhada de oito filhotes: 3 de cor preta uniforme, 3 de cor marrom uniforme, 1 preto e branco e 1 marrom e branco.

a) Quais os genótipos dos pais?
b) Se o filho preto e branco for cruzado com uma fêmea cujo genótipo é igual ao da mãe dele, qual a proporção esperada de descendentes iguais a ele?

CAPÍTULO

5 O MAPEAMENTO DOS GENES NOS CROMOSSOMOS

► Mosca do gênero *Drosophila*, um dos organismos mais utilizados em estudos genéticos.

5.1 Teoria Cromossômica da Herança

A descoberta do papel dos cromossomos na herança

Como vimos no capítulo 1, houve grande desenvolvimento da Citologia desde a publicação dos trabalhos de Mendel, em 1865. Descobriram-se os cromossomos e seu comportamento durante as divisões celulares, tanto na mitose como na meiose. Reconheceu-se que este último processo era complementar à fecundação e permitia manter constante, ao longo das gerações, o número de cromossomos dos organismos diplóides.

Nos anos de 1884 e 1885, quatro biólogos alemães — Oskar Hertwig (1849-1922), Edouard Adolf Strasburger (1844-1912), Rudolf Albert von Kölliker (1817-1905) e August Weismann (1834-1914) — sugeriram, em trabalhos independentes, que os cromossomos poderiam ser a base celular da hereditariedade. Eles se apoiavam no fato de os cromossomos serem transmitidos de geração a geração pelos gametas e de seu número se manter constante em organismos de mesma espécie. Essas evidências, porém, ainda eram insuficientes para que a hipótese fosse aceita pela comunidade científica.

A hipótese de Sutton e de Boveri

Com a redescoberta dos trabalhos de Mendel, em 1900, aumentou o interesse em descobrir a localização física dos fatores mendelianos. Em 1903, o norte-americano Walter S. Sutton (1877-1916), na época estudante de Biologia, mostrou que havia uma coincidência

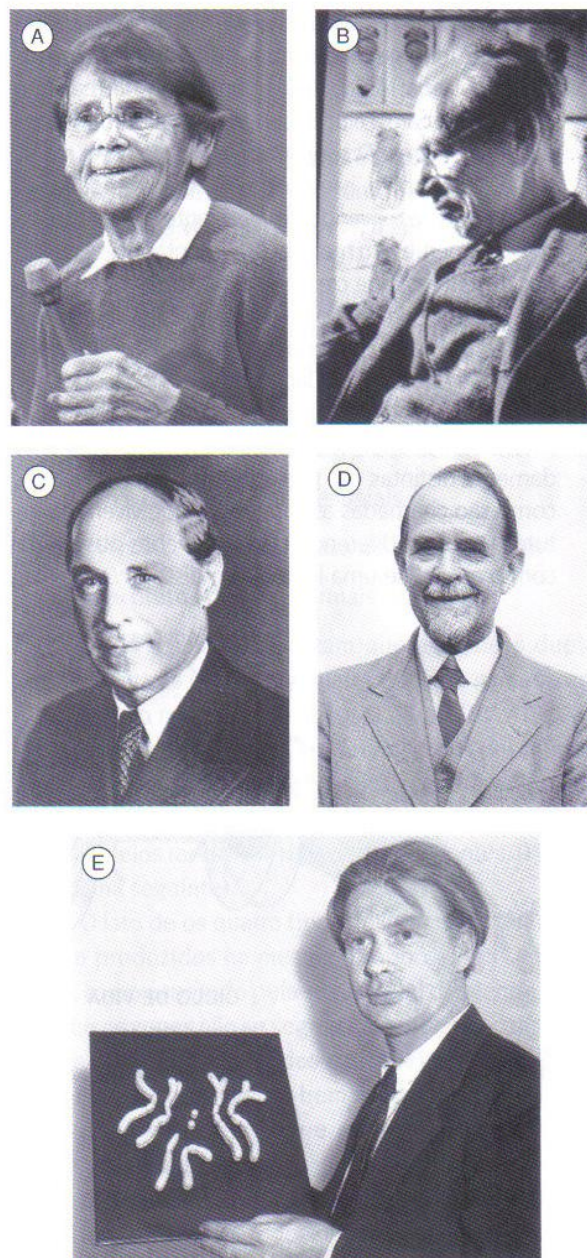
exata entre o comportamento dos fatores hereditários propostos por Mendel e o comportamento dos cromossomos na meiose e na fertilização. Estudando a meiose em uma espécie de gafanhoto, Sutton observou que os cromossomos homólogos se separavam exatamente da mesma maneira que os fatores mendelianos. Com base nisso, o pesquisador elaborou a hipótese, posteriormente confirmada, de que os fatores hereditários localizam-se nos cromossomos e que a separação dos cromossomos homólogos na meiose é o fenômeno responsável pela segregação dos alelos de um gene.

Na época em que Sutton propôs sua hipótese, o cientista alemão Theodor Boveri (1862-1915) descobriu que os ovos de ouriço-do-mar precisavam ter um conjunto completo de cromossomos para se desenvolver normalmente; a falta de um ou mais cromossomos impedia o desenvolvimento normal. Boveri concluiu, acertadamente, que nos cromossomos havia fatores que controlam o desenvolvimento.

Por seus trabalhos, Sutton e Boveri são considerados os fundadores da **teoria cromossômica da herança**, segundo a qual os cromossomos são a base física da hereditariedade. **(Fig. 5.1)**

▲ **Figura 5.1** • Walter S. Sutton (à esquerda) e Theodor Boveri são considerados os fundadores da teoria cromossômica da herança.

As provas científicas definitivas de que os genes realmente se localizam nos cromossomos foram obtidas durante a década de 1910 pelo pesquisador norte-americano Thomas Hunt Morgan (1866-1945) e por três de seus estudantes, Alfred H. Sturtevant (1891-1970), Calvin B. Bridges (1889-1938) e Herman J. Muller (1890-1967). Em uma série de experimentos com a mosca-do-vinagre *Drosophila melanogaster*, Morgan e seus colaboradores estabeleceram as bases da teoria cromossômica da herança. A partir de então a Genética desenvolveu-se, tornando-se um dos mais importantes ramos da Biologia moderna.

Uma pesquisadora que merece ser citada como uma das co-fundadoras da Genética é a norte-americana Barbara McClintock (1902-1992), que confirmou em milho os resultados obtidos em drosófila, além de ter realizado outras descobertas inéditas. Por suas contribuições para o desenvolvimento da Genética, Thomas H. Morgan e Barbara McClintock receberam o Prêmio Nobel em Medicina ou Fisiologia, ele em 1933 e ela em 1983. **(Fig. 5.2)**

▲ **Figura 5.2** • **A.** Barbara McClintock. **B.** Alfred H. Sturtevant. **C.** Herman J. Muller. **D.** Thomas H. Morgan. **E.** Calvin B. Bridges. A primeira trabalhando com milho e os quatro últimos, com *Drosophila melanogaster*, obtiveram provas irrefutáveis de que os genes localizam-se nos cromossomos.

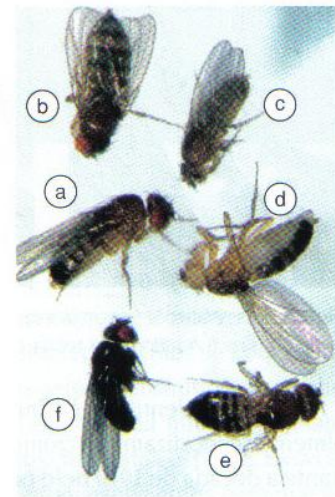
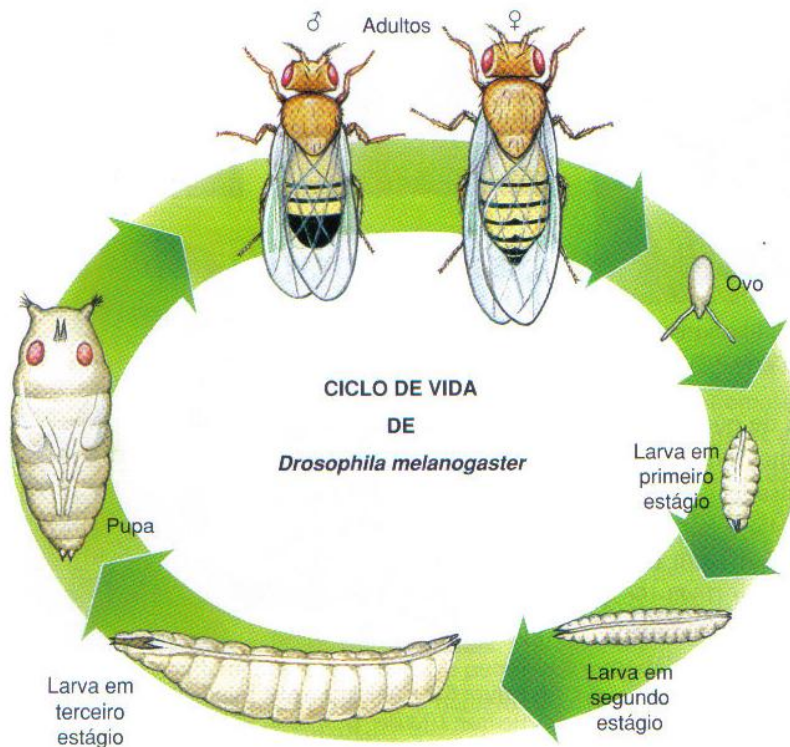
QUADRO 5.1 • *Drosophila melanogaster* como material experimental

Em seus experimentos, os biólogos escolhem determinados animais e plantas por serem adequados às pesquisas que se quer realizar. As ervilhas-de-cheiro utilizadas por Mendel, os ouriços-do-mar de Boveri e os gafanhotos de Sutton foram escolhidos por serem os organismos mais apropriados e mais facilmente disponíveis para a realização dos experimentos.

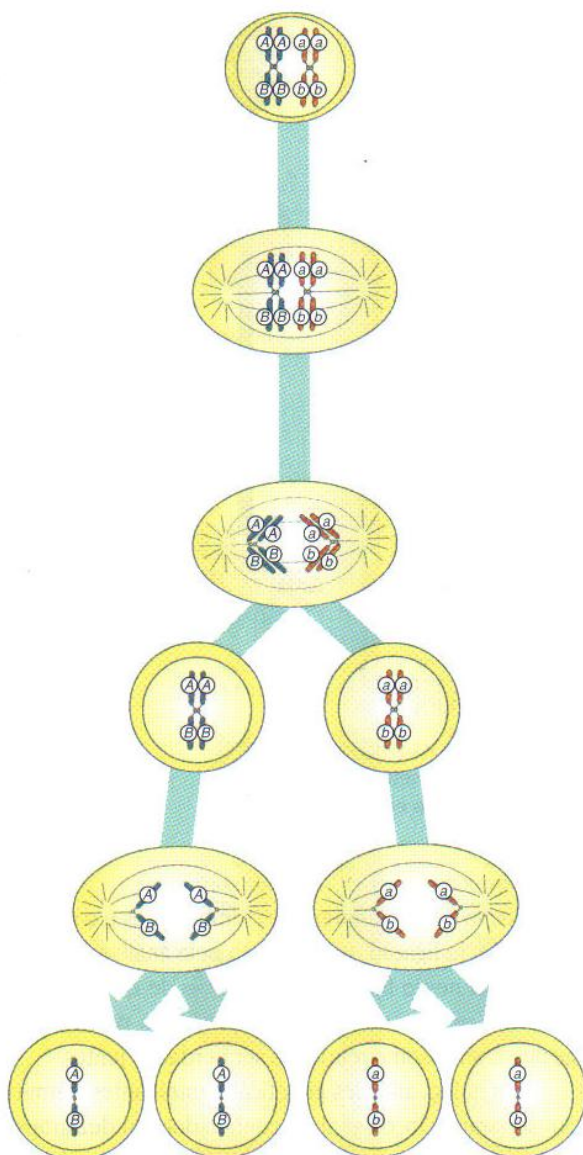
A pequena mosca do gênero *Drosophila*, popularmente chamada de mosca-do-vinagre ou mosca-da-banana, é um dos organismos que mais têm contribuído para a elucidação de princípios fundamentais da Genética. *Drosophila melanogaster* é uma espécie cosmopolita, isto é, encontrada em todas as regiões terrestres, vivendo em ambientes domésticos e, principalmente, em mercados, alimentando-se de fungos (leveduras) que crescem sobre frutas bem maduras. Essa espécie de mosca é fácil de criar, seu ciclo de vida é curto e há centenas de mutantes conhecidos, isolados e mantidos em laboratório. Os indivíduos portadores de genes mutantes têm características como a cor do olho, a forma da asa e a cor do corpo marcadamente distintas das presentes nos tipos selvagens, como são chamadas as variedades que vivem na natureza, e essas diferenças são facilmente observadas com o auxílio de uma lupa. Além disso, a *Drosophila melanogaster* apresenta apenas quatro pares de cromossomos, o que facilita a localização dos genes estudados.

Ciclo de vida

A drosófila produz uma nova geração a cada 2 semanas. Cada fêmea põe centenas de ovos durante a vida, produzindo grande número de descendentes. Nos laboratórios de Genética, as culturas são mantidas em frascos de vidro ou plástico, fechados com rolhas de espuma plástica ou de algodão. Os tubos contêm meio de cultura preparado à base de banana e ágar, tendo consistência de gelatina solidificada. Nesse meio desenvolvem-se leveduras, entre elas o fermento-de-padaria *Saccharomyces cerevisae*, que constituem o principal alimento das larvas de drosófila. Em determinada fase de desenvolvimento, as larvas sobem pela parede dos tubos, à qual aderem, transformando-se em pupas. Ao nascer, as jovens moscas são transferidas para outros vidros com meio de cultura. Os métodos de cultivo da drosófila foram desenvolvidos por Morgan e seus colaboradores na famosa "Sala das Moscas" da Universidade de Columbia, em Washington, nos EUA. **(Fig. 5.3)** ■

♂ Adultos ♀
Ovo
CICLO DE VIDA
DE
Drosophila melanogaster
Larva em primeiro estágio
Larva em segundo estágio
Larva em terceiro estágio
Pupa

▲ **Figura 5.3** • Representação dos estágios de desenvolvimento da mosca *Drosophila melanogaster*. Na foto, mosca selvagem (a), e alguns tipos de mutantes: asa truncada (b), olho em barra (c), olho branco (d), asa vestigial (e), corpo preto (f).

5.2 Ligação gênica

Como vimos no capítulo 4, genes localizados em pares diferentes de cromossomos homólogos segregam-se independentemente, durante a meiose. Por sua vez, genes localizados em um mesmo cromossomo tendem a ir juntos para o mesmo gameta; diz-se, por isso, que esses genes estão em ligação, ou que apresentam **ligação gênica**, ou **ligamento fatorial** (em inglês *linkage*, ligação). **(Fig. 5.4)**

▲ **Figura 5.4** • Esquema que mostra o comportamento meiótico de dois genes (***A*/*a*** e ***B*/*b***) localizados no mesmo cromossomo. A menos que ocorra o fenômeno da permutação, genes situados no mesmo cromossomo dirigem-se juntos para as células-filhas. Por isso, diz-se que esses genes apresentam ligação gênica (ou *linkage*).

Genes em ligação e cromossomos

Um caso de ligação entre genes situados no mesmo cromossomo de *Drosophila melanogaster* é o das características cor do corpo e tamanho da asa. A cor do corpo de moscas encontradas na natureza (traço selvagem) é cinzento-amarelada, sendo condicionada pelo alelo dominante ***P***; uma mutação recessiva surgida em laboratório, o alelo ***p***, condiciona corpo preto. A forma das asas é alongada nos indivíduos selvagens, sendo condicionada pelo alelo dominante ***V***; uma mutação recessiva surgida em laboratório, o alelo recessivo ***v***, condiciona asa de tamanho reduzido, denominada vestigial.

Quando fêmeas selvagens de corpo cinzento-amarelado e asas normais (***PPVV***) são cruzadas com machos pretos de asas vestigiais (***ppvv***), a geração F_1 é inteiramente constituída por machos e fêmeas com fenótipo selvagem (corpo cinzento-amarelado e asas normais). As fêmeas da geração F_1, no cruzamento-teste com machos pretos de asas vestigiais (***ppvv***), produzem quatro tipos de descendente, nas seguintes porcentagens:

41,5% cinzento-amarelados de asas normais

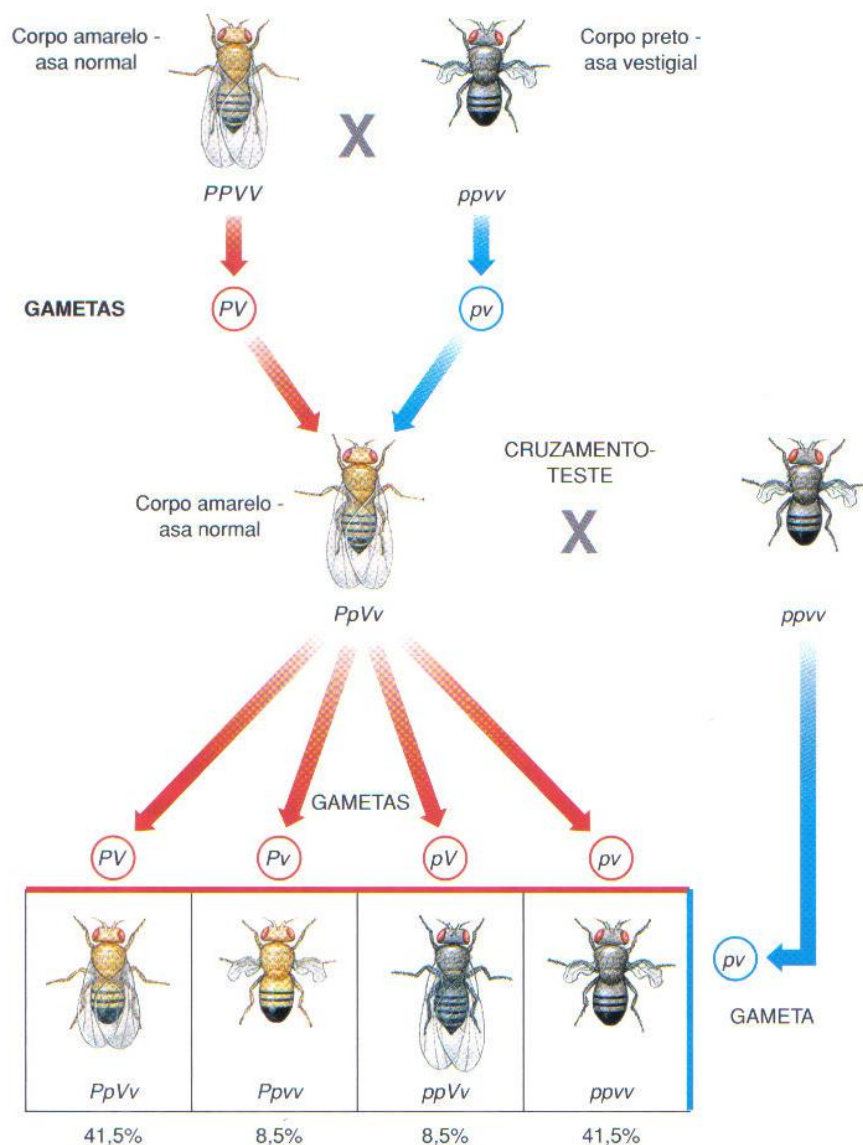
41,5% pretos de asas vestigiais

8,5% cinzento-amarelados de asas vestigiais

8,5% pretos de asas normais

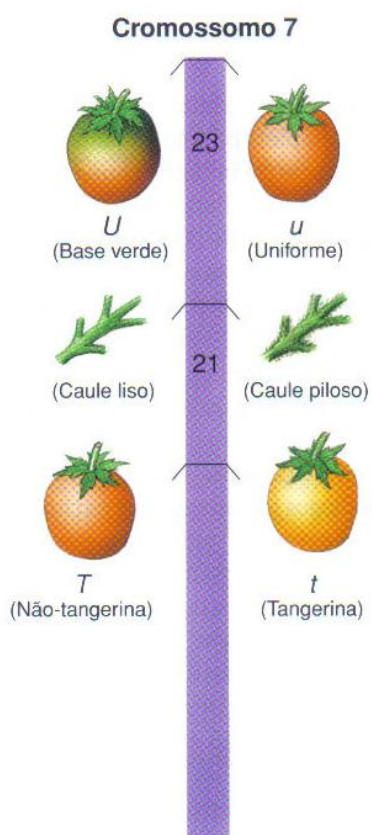
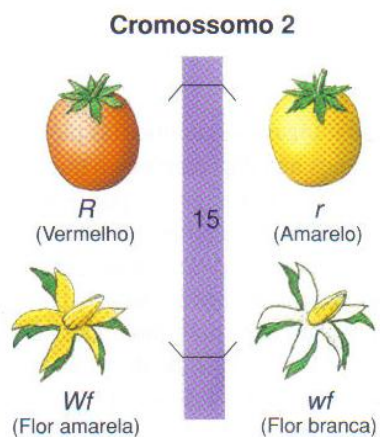
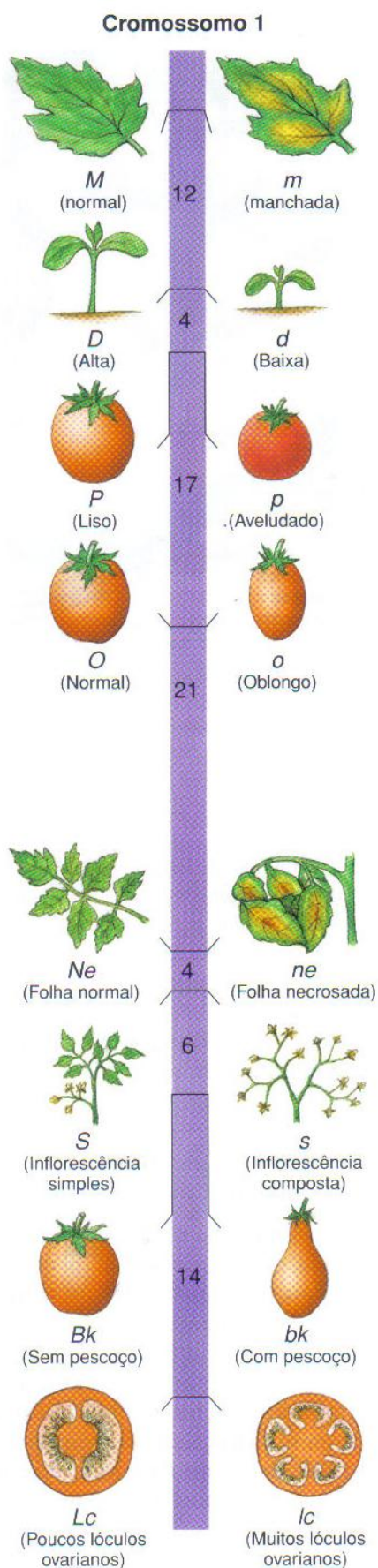
Esses resultados indicam que as fêmeas duplo-heterozigóticas produzem quatro tipos de gameta, embora não em mesma proporção: 41,5% são ***PV***, 41,5% ***pv***, 8,5% ***Pv*** e 8,5% ***pV***. Note que o fenótipo dos descendentes é determinado pela constituição genética do óvulo, uma vez que o macho, sendo duplo-recessivo, fornece apenas alelos recessivos para os descendentes. **(Fig. 5.5, na página seguinte)**

O fato de os quatro tipos de gameta da fêmea não serem produzidos na mesma proporção (25% de cada tipo), como esperado pela segunda lei de Mendel, mostra que os genes não se segregaram independentemente. Gametas portadores dos alelos ***P*/*V*** e dos alelos ***p*/*v*** ocorrem em porcentagens bem maiores do que gametas portadores dos alelos ***P*/*v*** e ***p*/*V***. Qual é o significado desses resultados?

Morgan atribuiu os resultados obtidos nesse cruzamento à localização dos genes para cor do corpo e tamanho da asa no mesmo par de cromossomos homólogos da drosófila. Por fazerem parte da estrutura do mesmo cromossomo, eles não se segregam independentemente (relembre a explicação para a segregação independente no capítulo 4).

▲ **Figura 5.5** • Esquema de um cruzamento em drosófila que mostra a segregação não-independente dos genes para cor do corpo e forma das asas. O cruzamento-teste de fêmeas duplo-heterozigóticas (com machos duplo-recessivos) mostra que elas formam quatro tipos de gametas, mas em proporções diferentes das esperadas pela lei da segregação independente.

Em 1915, Morgan e seus colaboradores já haviam descoberto 85 mutações em drosófila. Analisando os cruzamentos, eles verificaram que alguns desses mutantes apresentavam segregação independente, enquanto outros apresentavam ligação gênica. Com base nesses dados, Morgan e sua equipe separaram as 85 mutações em quatro grupos, denominados **grupos de ligação**. Os genes de um mesmo grupo apresentavam ligação entre si, mas segregavam-se independentemente de genes dos outros três grupos.

Os estudos citológicos de *Drosophila melanogaster*, por sua vez, mostraram que essa espécie possui 4 pares de cromossomos ($2n = 8$). Existia, portanto, um exato paralelismo entre o número de cromossomos e o número de grupos de ligação determinado pela análise genética. Morgan viu nesse fato um forte indício de que os genes estão nos cromossomos. Genes que fazem parte de um mesmo cromossomo tendem a ser herdados juntos.

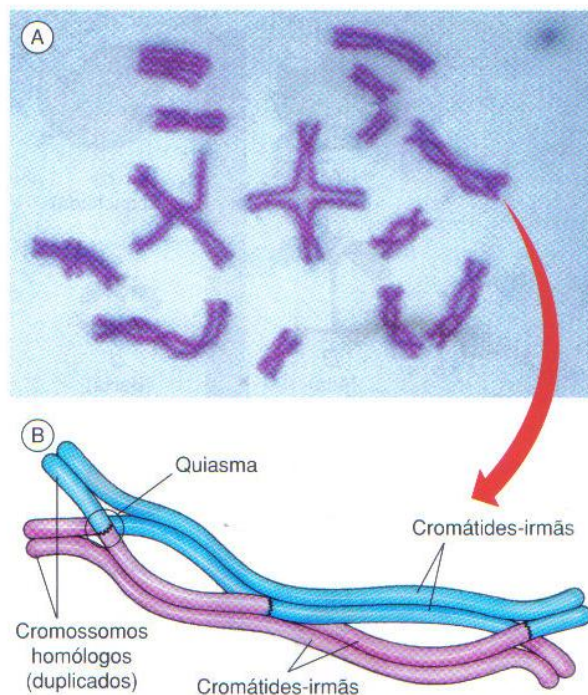
Em milho, análises genéticas semelhantes permitiram separar os locos gênicos conhecidos em dez grupos de ligação. Não por acaso, o número de pares de cromossomos do milho é 10 ($2n = 20$). Na espécie humana há 24 grupos de genes em ligação, correspondentes aos 22 autossomos e aos cromossomos sexuais X e Y. O tomate tem 12 grupos de ligação e 12 pares de cromossomos homólogos. **(Fig. 5.6)**

▲ **Figura 5.6** • Esquema de três dos 12 pares de cromossomos do tomate, mostrando a localização de alguns genes, cada um deles com dois alelos. Os números entre os genes indicam a distância relativa entre eles no cromossomo.

Explicando a recombinação pela permutação

Uma questão intrigava os geneticistas pioneiros: a ligação entre os genes não era completa, o que era evidenciado pelo fato de aparecerem fenótipos recombinantes na descendência. Para entender essa questão, vamos relembrar o cruzamento de fêmeas de drosófila duplo-heterozigóticas quanto aos alelos para cor do corpo e tamanho da asa, descrito anteriormente. Pela análise de seus pais, concluímos que um dos cromossomos da fêmea apresenta os alelos ***P/V***, recebidos da mãe, enquanto seu homólogo apresenta os alelos ***p/v***, recebidos do pai. Como os cromossomos homólogos separam-se na meiose, era de esperar que essas fêmeas formassem apenas dois tipos de gameta: 50% com o cromossomo materno, portador dos alelos dominantes (***P/V***), e 50% com o cromossomo paterno, portador dos alelos recessivos (***p/v***). Entretanto, os resultados mostram que, além desses dois tipos de gameta, as fêmeas duplo-heterozigóticas formaram também gametas recombinantes, 8,5% deles com os alelos ***P/v*** e 8,5% com os alelos ***p/V***.

A ligação entre genes localizados em um mesmo cromossomo não é completa porque, durante a meiose, ocorrem quebras e trocas de pedaços entre cromátides de cromossomos homólogos. Esse fenômeno, conhecido como **permutação** (em inglês ***crossing-over***), leva à formação de certo número de gametas com novas combinações entre os alelos — **gametas recombinantes** —, diferentes das existentes nos cromossomos herdados dos pais — os **gametas parentais**.

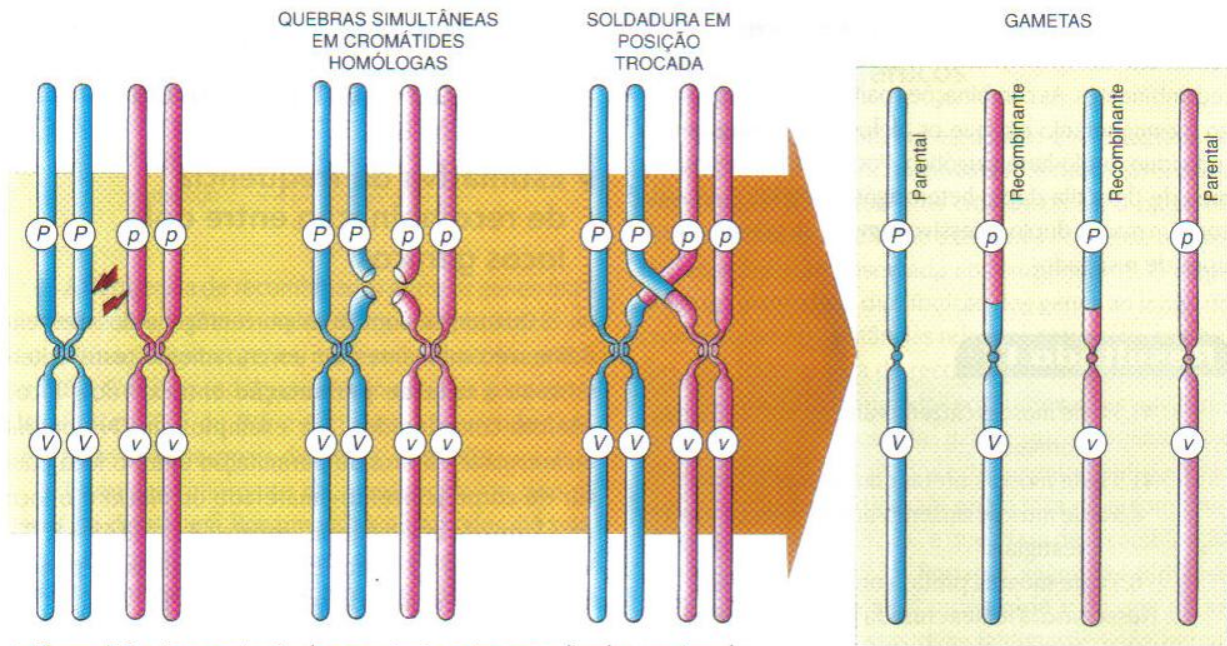
A hipótese da permutação foi proposta em 1909 pelo citologista belga Frans Alfons Janssens (1863-1924), para explicar o entrelaçamento entre cromátides de cromossomos homólogos (quiasmas), que os citologistas vinham observando em seus estudos de meiose. Quando os cromossomos homólogos iniciam sua separação, na prófase I da meiose, há locais em que a cromátide de um homólogo cruza-se com uma cromátide do outro. Esses locais são visualizados ao microscópio óptico como uma letra X, e por isso foram denominados **quiasmas** (do grego *khiasmós*, disposição em cruz, em forma da letra *khi*, X). **(Fig. 5.7)**

Partindo da idéia de Janssens, Morgan elaborou uma hipótese para explicar a ligação incompleta entre os genes. Ele imaginou que, durante a meiose das fêmeas de drosófila, há uma certa chance de ocorrerem permutações entre cromátides homólogas. Se algumas dessas permutações ocorrerem exatamente entre os genes para cor do corpo e o tamanho da asa, a ligação é rompida e formam-se dois tipos de cromátides recombinantes, uma com os alelos ***P/v***, e outra com os alelos ***p/V***. **(Fig. 5.8)**

▲ **Figura 5.7** • **A.** Fotomicrografia ao microscópio de luz de cromossomos de gafanhoto em processo de meiose, mostrando quiasmas. **B.** Representação de um par de cromossomos homólogos emparelhados (bivalente ou tétrade) mostrando a troca de pedaços entre cromátides homólogas que originam os quiasmas.

A hipótese de Morgan foi amplamente confirmada em diversos organismos. A formação de recombinantes entre dois ou mais genes localizados em um mesmo par de cromossomos homólogos é conseqüência de permutações ocorridas entre os locos gênicos considerados, durante a divisão meiótica que leva à formação dos gametas. O termo **loco gênico** é utilizado pelos cientistas para designar o local do cromossomo onde se localiza determinado gene.

Arranjos "cis" e "trans" de genes ligados

Considerando-se dois genes ligados, como, por exemplo, os que condicionam cor do corpo (***P/p***) e forma da asa (***V/v***) em drosófila, um indivíduo duplo-heterozigótico pode ter os alelos dispostos de duas diferentes maneiras no cromossomo:

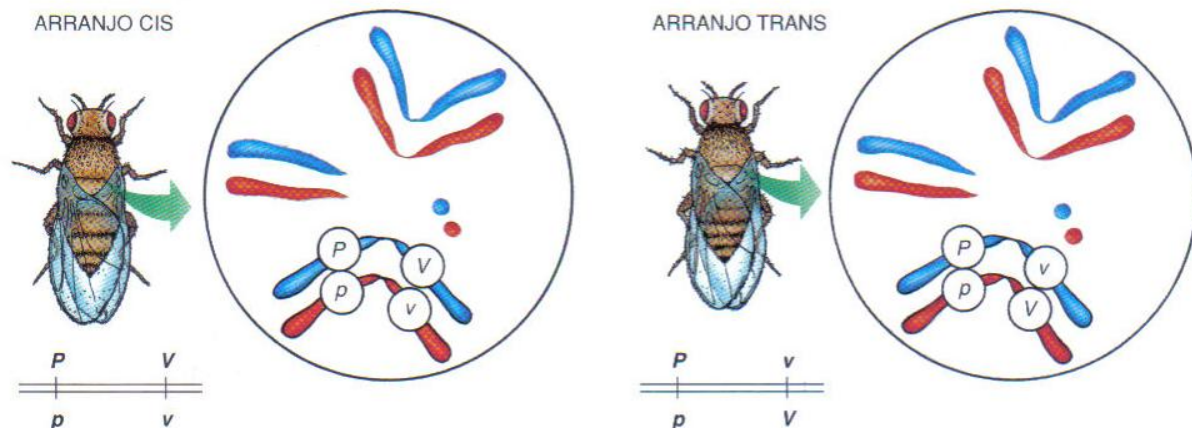
1. os alelos dominantes ***P/V*** situam-se em um dos cromossomos, enquanto os alelos recessivos ***p/v*** situam-se no homólogo correspondente;
2. o alelo dominante ***P*** e o alelo recessivo ***v*** situam-se em um dos cromossomos, enquanto o alelo recessivo ***p*** e o alelo dominante ***V*** situam-se no homólogo correspondente.

▲ **Figura 5.8** • Representação da permutação entre genes ligados, mostrando a formação de dois cromossomos com combinações gênicas parentais e dois recombinantes. Os cromossomos parentais originam-se das cromátides não envolvidas na permuta e os recombinantes, das cromátides permutadas.

O arranjo 1, em que os alelos dominantes estão em um cromossomo e os recessivos no outro, é chamado de **cis**. O arranjo 2, em que cada cromossomo do par tem um alelo dominante de um dos genes e o alelo recessivo do outro, é chamado de **trans**. **(Fig. 5.9)**

Os geneticistas costumam representar os genes ligados separados por uma linha horizontal simples ou dupla, como é mostrado a seguir para um arranjo do tipo trans:

Uma forma mais simples de representar os arranjos dos genes ligados é separando os alelos de cada um dos homólogos por uma barra inclinada. Por exemplo, ***PV/pv*** representa o arrranjo **cis** e ***Pv/pV*** o arranjo **trans**.

Identificando os arranjos gênicos em um duplo-heterozigótico

O arranjo dos alelos de dois genes ligados em um indivíduo duplo-heterozigótico é facilmente identificado em um cruzamento-teste, no qual um duplo-heterozigótico é cruzado com um duplo recessivo. Na descendência, as classes que aparecem em maior freqüência são as porta-

▲ **Figura 5.9** • Representação dos arranjos cis e trans de dois genes ligados em drosófila. As cores distinguem cromossomos de origem materna e de origem paterna em fêmeas dessa espécie.

doras das combinações parentais dos alelos; as que aparecem em menor freqüência, conseqüentemente, são as recombinantes. As combinações parentais correspondem ao mesmo arranjo em que os alelos se encontravam no indivíduo duplo-heterozigótico. Por exemplo, se uma fêmea de drosófila duplo-heterozigótica (***PpVv***) é cruzada com um macho duplo recessivo (***ppvv***), são possíveis dois tipos de resultado:

Resultado I

41,5% de moscas cinzento-amareladas com asas normais
41,5% de moscas pretas com asas vestigiais
8,5% de moscas cinzento-amareladas com asas vestigiais
8,5% de moscas pretas com asas normais

Nesse caso, a fêmea cruzada produziu os seguintes tipos de gameta:

41,5% ***PV*** (parental)
41,5% ***pv*** (parental)
8,5% ***Pv*** (recombinante)
8,5% ***pV*** (recombinante)

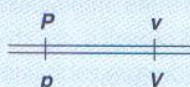
Conclui-se, portanto, que nela os alelos estavam em arranjo **cis**.

Resultado II

41,5% de moscas cinzento-amareladas com asas vestigiais
41,5% de moscas pretas com asas normais
8,5% de moscas cinzento-amareladas com asas normais
8,5% de moscas pretas com asas vestigiais

Nesse caso, a fêmea cruzada produziu os seguintes tipos de gameta:

41,5% ***Pv*** (parental)
41,5% ***pV*** (parental)
8,5% ***PV*** (recombinante)
8,5% ***pv*** (recombinante)

Conclui-se, portanto, que nela os alelos estavam em arranjo **trans**.

5.3 Mapeamento de cromossomos

Estimativa da freqüência de recombinação entre dois locos gênicos

Quando se somam as porcentagens dos descendentes recombinantes, em um cruzamento-teste, determina-se a **taxa de permutação** entre os dois locos gênicos considerados. Por exemplo, em *Drosophila melanogaster*, a taxa de permutação entre o loco para cor do corpo (cinzento-amarelado ou *black*) e o loco para forma da asa (longa ou vestigial) é 17% (8,5% + 8,5%). Veja na tabela 5.1 outros exemplos de taxas de permutação entre genes de drosófila. **(Tab. 5.1)**

TABELA 5.1 • Taxas de permutação em *Drosophila melanogaster*.

Loco considerado*	Taxas de recombinação
yellow e *vermilion*	32,2%
yellow e *white*	0,1%
yellow e *miniature*	33,7%
vermilion e *miniature*	3,0%
vermilion e *rudimentary*	26,9%
miniature e *rudimentary*	23,9%

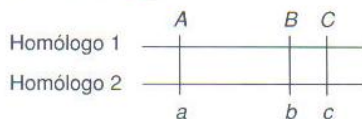
* Os locos gênicos da drosófila recebem denominações em inglês: *yellow* é corpo amarelo; *white* é olho branco; *miniature* é asa em miniatura; *rudimentary* é asa rudimentar, *vermilion* é olho vermelho.

Estimando distâncias entre genes

Duas perguntas levantadas pelos pesquisadores do grupo de Morgan foram:

a) Por que a taxa de recombinação entre dois determinados locos gênicos é sempre a mesma?
b) Por que as taxas de recombinação variam entre os diferentes locos gênicos?

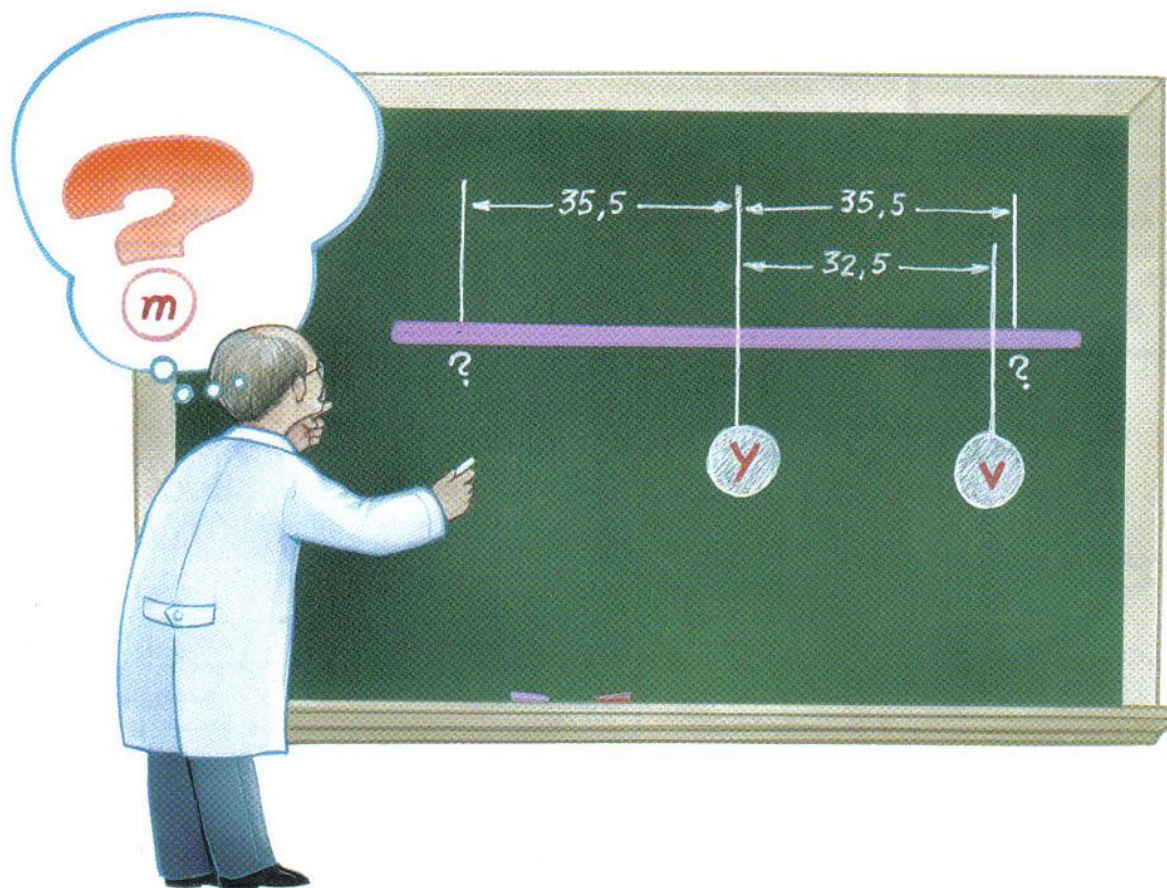
Uma vez que a recombinação entre genes ligados é conseqüência das permutações ocorridas entre eles, Morgan e sua equipe imaginaram que, quanto menor for a distância entre dois genes, menor será a probabilidade de ocorrer permutação entre eles. Isso se traduz na baixa freqüência de descendentes recombinantes.

Suponha, por exemplo, três pares de alelos ***A/a***, ***B/b*** e ***C/c***, situados no mesmo cromossomo e dispostos da forma mostrada a seguir:

A freqüência de recombinação entre os genes mais distantes (***A/a*** e ***C/c***) é maior do que a freqüência de recombinação entre genes mais próximos (***A/a*** e ***B/b*** ou ***B/b*** e ***C/c***), pois toda permutação entre os genes próximos (***A/a*** e ***B/b*** ou ***B/b*** e ***C/c***) estará ocorrendo também entre os genes mais distantes (***A/a*** e ***C/c***).

Esse raciocínio parte do pressuposto de que os genes se distribuem linearmente ao longo dos cromossomos, ocupando posições bem definidas. As experiências têm confirmado essa hipótese em todas as espécies de ser vivo, incluindo a espécie humana.

Princípio de construção dos mapas gênicos

Alfred Sturtevant, um estudante que estagiava no laboratório de Morgan, imaginou que seria possível construir "mapas genéticos" dos cromossomos, a partir da estimativa da distância entre os genes com base na taxa de recombinação observada nos cruzamentos. O mapa genético mostraria a distribuição dos genes ao longo do cromossomo e as distâncias relativas entre eles, estimadas com base na taxa de recombinação.

Um dos casos estudados por Sturtevant envolvia três locos gênicos da drosófila: *yellow* (***y***), *vermilion* (***v***) e *miniature* (***m***). Os resultados experimentais obtidos pelo grupo de Morgan indicavam que a taxa de recombinação entre ***y*** e ***v*** era de 32,2%, e que a taxa de recombinação entre ***y*** e ***m*** era de 35,5%. Portanto, segundo a hipótese de Morgan, ***y*** estaria mais próximo de ***v*** do que de ***m***. Entretanto, apenas essas duas informações não permitem saber em que ordem esses genes estão, isto é, se **v** está entre ***y*** e ***m***, ou se ***y*** está entre ***v*** e ***m***. **(Fig. 5.10)**

▲ **Figura 5.10** • Representação do raciocínio utilizado para determinar as distâncias entre os locos de três genes (*m*, *v* e *y*) a partir de suas taxas de recombinação. Para localizar *m* no mapa é preciso saber sua taxa de recombinação em relação a *v*.

É mais ou menos como determinar as distâncias entre as cidades **A** e **B** (300 km) e entre **A** e **C** (200 km) localizadas em uma rodovia. Sabemos que a cidade **A** é mais distante de **B** do que de **C**, mas essa informação não nos permite dizer se **C** localiza-se entre **A** e **B**, ou se **A** localiza-se entre **B** e **C**. Para determinar a seqüência dessas cidades precisamos conhecer a distância entre **B** e **C**. Se essa distância for de 100 km, concluímos que **C** localiza-se entre **A** e **B**. A outra possibilidade é que a distância entre **B** e **C** seja de 500 km; nesse caso, **A** localiza-se entre **B** e **C**. **(Fig. 5.11)**

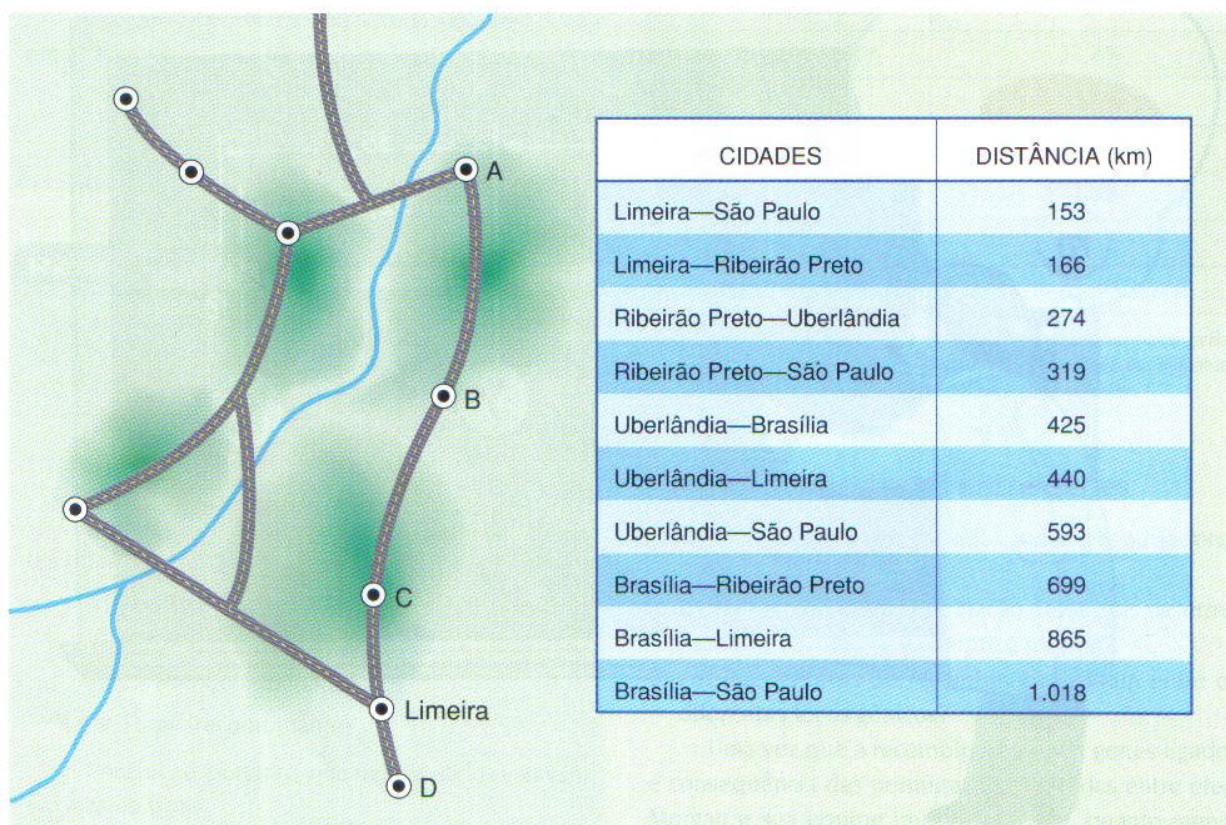
Sturtevant precisava saber a taxa de recombinação entre os locos ***v*** e ***m*** para determinar a seqüência dos três locos no cromossomo. Com isso, seria possível testar a hipótese de que a taxa de recombinação podia ser usada como medida de distância entre os genes. A distância entre os locos ***v*** e ***m*** poderia ser 67,7% (35,5 + 32,2) ou 3,3% (35,5 – 32,2).

A partir de cruzamentos-teste entre fêmeas duplo-heterozigóticas ***VvMm*** e machos recessivos, Sturtevant verificou que a porcentagem de recombinação entre os locos ***v*** e ***m*** era de 3%. Esse resultado, muito próximo de uma das previsões (3,3%), foi uma forte evidência de que as hipóteses consideradas para a construção de mapas genéticos estavam corretas.

Com base no mesmo raciocínio de Sturtevant, os cientistas têm construído mapas genéticos de diversos organismos além da drosófila, inclusive da espécie humana.

Unidade de distância dos mapas gênicos

A unidade utilizada como medida de distância entre genes no cromossomo é a **unidade de recombinação** (**UR**), ou **centimorgan**; esta última denominação é uma homenagem às importantes contribuições de Morgan à Genética. Uma unidade de recombinação, ou centimorgan, corresponde à taxa de 1% de recombinantes. Assim, quando se diz que a distância entre dois genes (ou entre dois locos gênicos) é de 17 UR, ou 17 centimorgans, significa que a taxa de recombinantes entre eles é de 17%. Como vimos, esse é o caso dos locos *black* (corpo preto) e *vestigial* (asas vestigiais) em *Drosophila melanogaster*.

CIDADES	DISTÂNCIA (km)
Limeira—São Paulo	153
Limeira—Ribeirão Preto	166
Ribeirão Preto—Uberlândia	274
Ribeirão Preto—São Paulo	319
Uberlândia—Brasília	425
Uberlândia—Limeira	440
Uberlândia—São Paulo	593
Brasília—Ribeirão Preto	699
Brasília—Limeira	865
Brasília—São Paulo	1.018

▲ **Figura 5.11** • A determinação da seqüência de cidades ao longo de uma estrada, a partir das distâncias entre elas, é uma boa analogia para o princípio de construção de mapas genéticos. Você seria capaz de descobrir quais são as cidades A, B, C e D, no mapa?

QUADRO 5.2 • Resolução de um problema de ligação incompleta

O problema

Em *Drosophila melanogaster*, asa selvagem (normal) é dominante sobre asa miniatura; olho selvagem (marrom-avermelhado) é dominante sobre olho vermelho. Fêmeas selvagens puras foram cruzadas com machos de asa miniatura e olhos vermelhos. As fêmeas da geração F_1 foram cruzadas com machos duplo homozigóticos recessivos, produzindo a seguinte descendência:

48,5% asa selvagem / olho selvagem
48,5% asa miniatura / olho vermelho
1,5% asa selvagem / olho vermelho
1,5% asa miniatura / olho selvagem

Pergunta-se:

a) Qual é a evidência de que se trata de um caso de ligação gênica?
b) Qual é o arranjo dos genes nas fêmeas duplo-heterozigóticas de F_1, **cis** ou **trans**?
c) Qual é a distância relativa entre os locos gênicos considerados?

A solução

Como se trata de um cruzamento-teste, o fenótipo da descendência é determinado pelo genótipo dos gametas produzidos pelo indivíduo com características dominantes. Assim, os tipos de óvulos que geraram cada uma das classes de descendentes são:

Fenótipos da descendência	Genótipo dos óvulos	Porcentagem
selvagem/ selvagem	***MV***	48,5%
miniatura/ vermelho	***mv***	48,5%
selvagem/ vermelho	***Mv***	1,5%
miniatura/ selvagem	***mV***	1,5%

Percebe-se que não se trata de segregação independente porque os gametas femininos não ocorrem na proporção de 1 : 1 : 1 : 1 (25% de cada tipo). Trata-se, portanto, de um caso de ligação gênica incompleta, pois se formaram quatro classes fenotípicas, duas em maior freqüência (classes parentais) e duas em menor freqüência (classes recombinantes). Isso responde à parte a) do problema.

Podemos agora responder à parte b): o arranjo dos alelos nas fêmeas duplo-heterozigóticas era **cis** (***MV/mv***). Isso pôde ser deduzido pelo fato de os gametas ***MV*** e ***mv*** terem sido produzidos em maior freqüência, 48,5% cada um.

Para responder à parte c) do problema, estimamos a distância relativa entre os dois locos gênicos a partir da freqüência de permutação entre eles. A freqüência de permutação é igual à soma das freqüências das classes recombinantes, ou seja, 3% (1,5% + 1,5%). Assim a distância entre dois locos gênicos é de 3 UR ou 3 centimorgans. ■

LEITURA

O PRIMEIRO MAPA CROMOSSÔMICO

Morgan percebeu que, para explicar a ligação gênica por meio da teoria de Janssens, seria necessário admitir que os fatores da hereditariedade estavam localizados linearmente ao longo de cada um dos cromossomos de um par de homólogos. Ou seja, os fatores estariam localizados em lugares definidos nos cromossomos e dispostos em ordem linear. [...] A partir dessa hipótese, Morgan deduziu que, para um determinado segmento de um par de cromossomos homólogos qualquer, a probabilidade de haver uma permutação entre suas cromátides não-irmãs dependeria do comprimento desse segmento. Se a chance de ocorrer uma permuta em qualquer ponto ao longo do cromossomo for a mesma, quanto maior for o segmento maior será a probabilidade de ocorrer uma permuta em um ponto qualquer do segmento.

Em novembro de 1912, Sturtevant, na época um estagiário na "Sala das Moscas", com base na hipótese de Morgan de que "o grau de ligação depende da distância entre os fatores", fez a seguinte

dedução:"Se a hipótese de Morgan estiver correta, a proporção de recombinantes pode ser usada como um indicador da distância entre dois fatores quaisquer. Ao se determinar a distância entre A e B e entre B e C, pode-se prever a distância entre A e C. Se a proporção de recombinantes realmente representar a distância entre os fatores, a distância AC deverá ser, aproximadamente, a soma entre as distâncias AB e BC, ou sua diferença".

Em seu livro, *A History of Genetics* (1965), Sturtevant conta que teve essa idéia ao voltar para casa após uma discussão de fim de tarde no laboratório. Entusiasmado com a idéia, ele voltou ao laboratório naquela mesma noite e, com os dados disponíveis sobre os cruzamentos já realizados pelo grupo, construiu o primeiro mapa cromossômico (ou mapa de ligação gênica), utilizando 5 alelos mutantes localizados no cromossomo X, e seus respectivos alelos selvagens: um para corpo de cor (*yellow* = ***y***), dois para cor dos olhos (*white* = ***w*** e *vermilion* = ***v***) e dois para tamanho alterado das asas (*miniature* = ***m*** e *rudimentary* = ***r***). Um mapa mais elaborado foi preparado por ele (Sturtevant, 1913) como tema de sua tese de doutoramento.

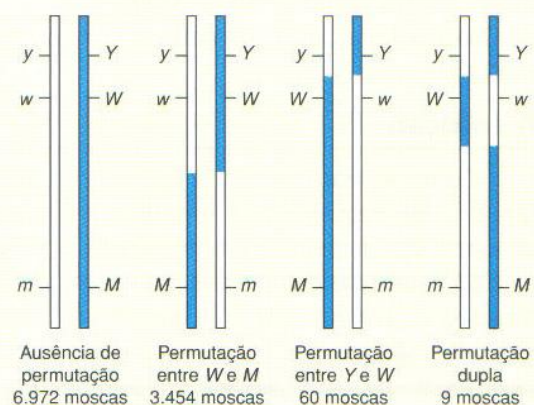
[...] Uma situação intrigante encontrada nos experimentos é que a distância determinada diretamente a partir da porcentagem de recombinantes entre dois locos gênicos era sempre menor do que a determinada pela soma das distâncias entre os locos intermediários. Por exemplo, quando a distância entre os genes ***y*** e ***r*** era determinada por experimentos que utilizavam apenas a porcentagem de recombinantes entre esses dois locos, o valor encontrado era menor do que o previsto a partir da soma das distâncias entre genes localizados entre eles.

Sturtevant levantou a hipótese de que essas diferenças poderiam ser devidas à ocorrência de permutações duplas. Tal fenômeno colocaria os alelos de volta no cromossomo original. O resultado final seria uma aparente ausência de permutação entre os dois locos, quando, na realidade, ocorreram duas. Mas de que modo a hipótese da ocorrência de permutação dupla poderia ser testada?

Sturtevant testou essa hipótese usando três genes simultaneamente. Em um experimento, ele cruzou fêmeas que tinham os alelos ***y***, ***w*** e ***m*** em um dos cromossomos X e os alelos ***Y***, ***W*** e ***M*** no outro cromossomo X, com machos que possuíam os 3 alelos recessivos, obtendo 10.495 descendentes, analisados com relação a seus fenótipos.

Se não ocorresse permutação entre os locos ***y*** e ***m***, metade dos descendentes seria do tipo selvagem e a outra metade teria corpo de cor amarela (*yellow*), olhos brancos (*white*) e asas reduzidas (*miniature*). Sturtevant verificou que 6.972 moscas apresentavam um ou outro desses dois fenótipos.

Se ocorresse permutação entre os locos ***w*** e ***m***, as moscas teriam corpo de cor amarela, olhos brancos e asas longas ou olhos e cor do corpo do tipo selvagem, com asas mutantes (reduzidas). Sturtevant encontrou 3.454 moscas que apresentam um ou outro desses dois fenótipos.

Permutação entre os locos ***y*** e ***w*** resultaria em moscas com corpo de cor amarela e asas e olhos do tipo selvagem ou moscas com cor do corpo do tipo selvagem, mas com olhos brancos e asas reduzidas. Apenas 60 moscas com um ou outro desses dois fenótipos foram encontradas, o que indicava que os locos ***y*** e ***w*** estavam situados muito próximos no cromossomo. Finalmente, foram obtidos apenas nove indivíduos, dentre os 10.495, que apresentavam corpo de cor amarela, olhos vermelhos e asas reduzidas ou olhos brancos e cor do corpo e asas do tipo selvagem, como está mostrado na figura a seguir.

A origem dessas duas classes fenotípicas pode ser explicada pela ocorrência de permutação dupla. É necessário analisar no mínimo 3 genes para detectar a ocorrência de permutação dupla. Se apenas os locos ***y*** e ***m*** tivessem sido utilizados, qualquer permutação dupla entre eles não seria detectada, uma vez que os alelos ***y*** e ***m*** teriam reassumido suas posições originais. Para evitar erros devidos à ocorrência de permutações duplas, os pesquisadores da "Sala das Moscas" faziam seus mapas cromossômicos por meio da soma dos dados de cruzamentos que envolviam locos próximos.

- **Fonte:** John A. Moore, Science as a Way of Knowing, Genetics. *American Zoologist* v. 26: 1986, p. 583-747. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

5.1 Teoria Cromossômica da Herança

1. O que diz a Teoria Cromossômica da Herança?
2. Qual foi a importância dos estudos em drosófila para a consolidação da teoria cromossômica da herança?

5.2 Ligação gênica

3. O que significa o termo ligação gênica?
4. Qual é a evidência de que dois genes estão localizados em um mesmo par de cromossomos homólogos, ou seja, de que há ligação entre eles?
5. Como se explica o fato de, em muitos casos, a ligação gênica não ser completa, ou seja, de se formar certa quantidade de gametas recombinantes?
6. Conceitue loco gênico.
7. Conceitue os termos **cis** e **trans**, utilizados para designar combinações de alelos de genes ligados.
8. Como se costuma representar genes ligados?
9. Como se pode determinar o tipo de arranjo dos alelos de genes ligados presentes em um indivíduo duplo-heterozigótico?

5.3 Mapeamento de cromossomos

10. Conceitue e exemplifique taxa de permutação entre dois locos gênicos.
11. Qual foi a hipótese de Morgan para explicar o fato de a taxa de recombinação ser constante entre dois determinados locos?
12. Explique por que a taxa de recombinação entre dois genes distantes é maior do que entre genes mais próximos.
13. O que é mapa genético?
14. Qual é a unidade de distância utilizada em mapas genéticos?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 15 a 19.

a) Ligação gênica.
b) Centimorgans, ou unidades de recombinação.
c) Mapa cromossômico.
d) Permutação cromossômica (*crossing-over*).
e) Recombinação gênica.

15. Que alternativa expressa a unidade de distância entre os locos gênicos no cromossomo?
16. Como se denomina o fenômeno de trocas de pedaços entre cromátides-irmãs na meiose?
17. Como se denomina a propriedade de produzir gametas com combinações de alelos diferentes das que foram recebidas dos pais?
18. Como se denomina a representação gráfica das posições relativas dos genes e suas distâncias relativas em um cromossomo?
19. Qual é o termo utilizado para designar os genes localizados em um mesmo cromossomo?
20. Em um cruzamento genético, verificou-se que um indivíduo duplo-heterozigótico ***AaBb*** formou 4 tipos de gametas na proporção de 40% ***AB*** : 40% ***ab*** : 10% ***Ab*** : 10% ***aB***. Trata-se de um caso de
    a) interação gênica.
    b) ligação gênica completa.
    c) ligação gênica incompleta.
    d) segregação independente.
21. No exemplo mencionado no exercício anterior, a distância entre os dois locos gênicos no cromossomo é estimada em
    a) 10 centimorgans.
    b) 20 centimorgans.
    c) 40 centimorgans.
    d) 80 centimorgans.
22. As taxas de recombinação entre três genes localizados em um mesmo par de cromossomos homólogos foram as seguintes: entre ***t*** e ***r*** = 3%; entre ***t*** e ***s*** = 8%; entre ***r*** e ***s*** = 10,5%. Com base nessas informações,
    a) conclui-se que a ordem desses genes no cromossomo é ***t-r-s***.
    b) conclui-se que a ordem desses genes no cromossomo é ***t-s-r***.
    c) conclui-se que a ordem desses genes no cromossomo é ***r-t-s***.
    d) nada se pode concluir sobre a ordem desses genes no cromossomo.

QUESTÕES DISCURSIVAS

23. Em coelhos, o gene que condiciona pelagem malhada é dominante sobre o alelo que condiciona pelagem de coloração homogênea. Da mesma forma, o gene que condiciona pêlo curto é dominante sobre o alelo que condiciona pêlo longo (tipo angorá). Coelhos de uma linhagem apresentando pelagem malhada e pêlos curtos foram cruzados com indivíduos de uma linhagem de pelagem tipo angorá e coloração homogênea. Os F_1 produzidos, apresentando todos pelagem manchada e pêlos curtos, foram cruzados com indivíduos de linhagem angorá e coloração homogênea. Nesse cruzamento foi obtido o seguinte resultado:

Número de indivíduos	Comprimento do pêlo	Tipo de coloração
68	Longo	Malhada
431	Longo	Homogênea
432	Curto	Malhada
69	Curto	Homogênea

Com base nesses resultados, responda:

a) Os genes em questão têm segregação independente? Justifique.

b) Qual a porcentagem de recombinação entre os dois locos gênicos?

24. A distância entre os locos *cinnabar* e *vestigial* em *Drosophila* é 9,5 UR. Os alelos dominantes desses genes, que representaremos por ***C*** e ***V***, condicionam, respectivamente, olhos marrom-avermelhados e asas normais. Os alelos recessivos condicionam olhos vermelhos (*c*) e asas vestigiais (*v*). O cruzamento entre uma fêmea duplo-heterozigótica com constituição *trans* e um macho duplo-recessivo produziu 1.360 descendentes.

a) Quantos desses 1.360 descendentes esperamos encontrar para cada fenótipo?

b) Se cruzássemos fêmeas selvagens (para ambas as características), filhas do casal com machos idênticos ao seu pai (fêmea duplo-heterozigótica × macho duplo-recessivo), obtendo 1.200 descendentes, quantos esperaríamos encontrar para cada classe fenotípica?

25. Drosófilas com genótipo ***AaBb*** cruzadas com outras com genótipo ***aabb*** geralmente produzem descendentes na seguinte proporção genotípica:

9 ***AaBb*** : 9 ***aabb*** : 1 ***Aabb*** : 1 ***aaBb***.

Entretanto, de um cruzamento-teste de uma fêmea duplo-heterozigótica nasceram descendentes na seguinte proporção genotípica:

1 ***AaBb*** : 1 ***aabb*** : 9 ***Aabb*** : 9 ***aaBb***.

Proponha uma hipótese para explicar o resultado do primeiro cruzamento e outra para explicar o resultado obtido no cruzamento com a última fêmea.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

26. (UFRS) Os seguintes conceitos genéticos foram escritos por um aluno que estava com dúvidas sobre a matéria e que pediu a um professor qualificado que os conferisse:

I. Os genes em um mesmo cromossomo tendem a ser herdados juntos e são denominados "genes ligados";

II. Quando uma característica particular de um organismo é governada por muitos pares de genes, que possuem efeitos similares e aditivos, nós dizemos que esta característica é uma característica poligênica;

III. Quando três ou mais alelos, para um dado "locus", estão presentes na população, dizemos que este "locus" possui alelos múltiplos;

IV. Um organismo com dois alelos idênticos para um "locus" em particular é considerado homozigoto para este "locus", enquanto um organismo com dois alelos diferentes para um mesmo "locus" é considerado heterozigoto para este "locus";

V. A aparência de um indivíduo com respeito a uma dada característica herdada é chamada de fenótipo.

Quais afirmativas o professor diria que estão corretas?

a) Apenas II, III e IV.
b) Apenas I, II, III e IV.
c) Apenas I, II, III e V.
d) Apenas II, III, IV e V.
e) I, II, III, IV e V.

27. (UEL) Quatro genes, A, B, C e D, localizados no mesmo cromossomo, apresentam as seguintes freqüências de recombinação:

A-B = 32% A-D = 12% B-D = 20%
A-C = 45% B-C = 13% C-D = 33%

A seqüência mais provável desses genes no cromossomo é

a) ABCD.
b) ABDC.
c) ACDB.
d) ADBC.
e) ADCB.

28. (UFRJ) Numa certa espécie de milho, o grão colorido é condicionado por um gene dominante B e o grão liso por um gene dominante R. Os alelos recessivos b e r condicionam, respectivamente, grãos brancos e rugosos. No cruzamento entre um indivíduo colorido liso com um branco rugoso, surgiu uma F_1, com os seguintes descendentes:

150 indivíduos que produziam sementes coloridas e lisas,
150 indivíduos que produziam sementes brancas e rugosas,
250 indivíduos que produziam sementes coloridas e rugosas e
250 indivíduos que produziam sementes brancas e lisas.

A partir desses resultados, podemos concluir que o genótipo do indivíduo parental colorido liso e a distância entre os genes B e R são

a) BR/br; 62,5 U.R;
b) BR/br; 37,5 U.R;
c) Br/bR; 62,5 U.R;
d) Br/bR; 37,5 U.R;
e) BR/br; 18,75 U.R.

29. (MACK) Analisando-se dois pares de genes em ligamento fatorial ("linkage") representados pelo híbrido BR/br, uma certa espécie apresentou a seguinte proporção de gametas:

BR - 48,5% br - 48,5% Br - 1,5% bR - 1,5%

Pela análise dos resultados, pode-se concluir que a distância entre os genes B e R é de

a) 48,5 morganídeos.
b) 97 morganídeos.
c) 1,5 morganídeo.
d) 3 morganídeos.
e) 50 morganídeos.

30. (PUCRS) Pelo que se conhece da disposição dos genes dos cromossomos, é de se esperar que a freqüência de permutação entre dois genes esteja na dependência

a) da distância entre eles.
b) do comprimento da zona centromérica.
c) da existência do fenômeno da pleiotropia.
d) do tipo de polimeria existente.
e) da ausência de nucleotídeos covalentes.

31. (UEL) Em camundongos, o alelo dominante E condiciona pêlos normais e o alelo recessivo e, pêlos encrespados. O alelo dominante A determina pelagem selvagem e o alelo recessivo a, albina. Os indivíduos F_1, obtidos a partir de cruzamentos EEAA × eeaa, ao serem cruzados com animais duplo-recessivos, originaram os seguintes descendentes:
160 com pêlos normais e albinos;
160 com pêlos encrespados e selvagens;
40 com pêlos normais e selvagens;
40 com pêlos encrespados e albinos.
Assinale a alternativa que contém as porcentagens corretas de cada tipo de gameta produzido pelos indivíduos F_1.
a) EA = 10; Ea = 40; eA = 40; ea = 10.
b) EA = 20; Ea = 30; eA = 30; ea = 20.
c) EA = 25; Ea = 25; eA = 25; ea = 25.
d) EA = 30; Ea = 20; eA = 20; ea = 30.
e) EA = 40; Ea = 10; eA = 10; ea = 40.

32. (UFRS) Com relação ao processo conhecido como *crossing-over*, podemos afirmar que o mesmo
a) diminui a variabilidade genética.
b) separa cromátides homólogas.
c) corrige a recombinação gênica.
d) aumenta a variabilidade genética.
e) troca cromossomos entre genes homólogos.

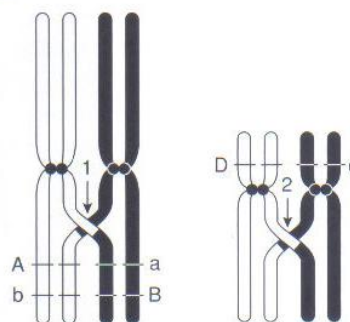
QUESTÕES DISCURSIVAS

33. (FUVEST) Uma espécie de lombriga de cavalo possui apenas um par de cromossomos no zigoto (2n=2). Um macho dessa espécie, heterozigótico quanto a dois pares de alelos (AaBb) formou, ao final da gametogênese, quatro tipos de espermatozóides normais com diferentes genótipos quanto a esses genes.
a) Qual é o número de cromossomos e o número de moléculas de DNA no núcleo de cada espermatozóide?
b) Quais são os genótipos dos espermatozóides formados?
c) Por que, a partir das informações fornecidas, não é possível estimar a proporção em que cada um dos quatro tipos de espermatozóides aparece? Explique.

34. (UFES) Três grupos de alunos realizaram cruzamentos-testes entre plantas de tomate para o estudo de diferentes genes. Os grupos obtiveram os seguintes resultados:

Grupos de alunos	Genes	Taxa de Recombinação
G1	*aw / wo*	9%
G2	*op / al*	14%
G3	*dil / sr*	50%

a) Indique o(s) grupo(s) que trabalhou (trabalharam) com genes ligados. Justifique.
b) O que significa, em Genética, o termo ligação? Qual é a sua utilidade para a pesquisa científica?
c) Calcule a distância, em unidades de mapa genético, entre os genes pesquisados pelos alunos do grupo G2.

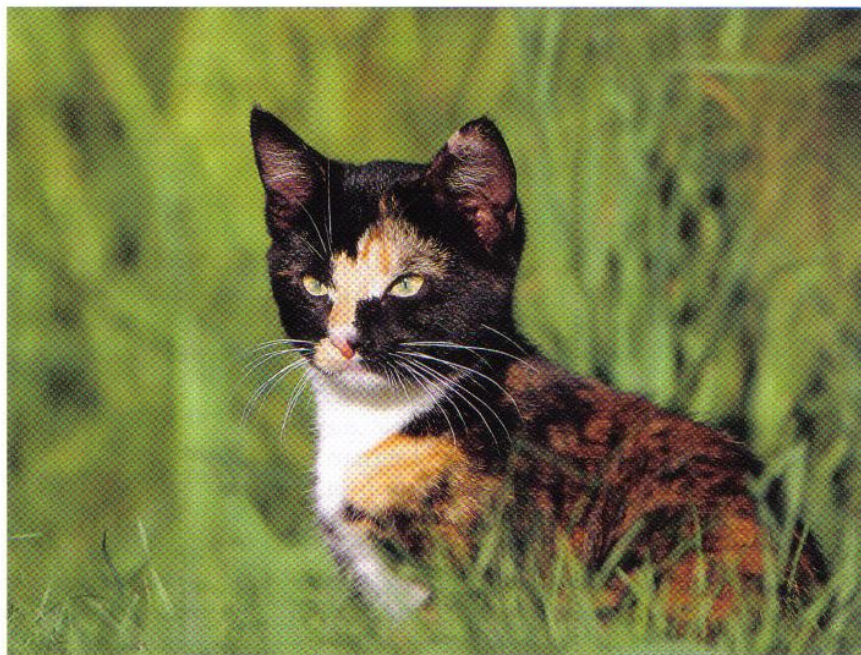
35. (FUVEST) O esquema a seguir representa, numa célula em divisão meiótica, dois pares de cromossomos com três genes em heterozigose: A/a, B/b e D/d. Nesses cromossomos, ocorreram as permutas indicadas pelas setas 1 e 2.

a) Quanto aos pares de alelos mencionados, que tipos de gameta esta célula poderá formar?
b) Que pares de alelos têm segregação independente?

36. (UNICAMP) Os locos gênicos A e B se localizam em um mesmo cromossomo, havendo 10 unidades de recombinação (morganídeos) entre eles.
a) Como se denomina a situação mencionada?
Supondo o cruzamento AB/ab com ab/ab:
b) Qual será a porcentagem de indivíduos AaBb na descendência?
c) Qual será a porcentagem de indivíduos Aabb?

37. (UFRJ) Considere a existência de dois locos em um indivíduo. Cada loco tem dois alelos "A" e "a" e "B" e "b", sendo que "A" e "B" são dominantes.
Um pesquisador cruzou um indivíduo "AaBb" com um indivíduo "aabb".
A prole resultante foi:
40% AaBb
40% aabb
10% Aabb
10% aaBb
O pesquisador ficou surpreso, pois esperava obter os quatro genótipos na mesma proporção, 25% para cada um deles.
Esses resultados contrariam a segunda lei de Mendel ou lei da segregação independente? Justifique sua resposta.

CAPÍTULO

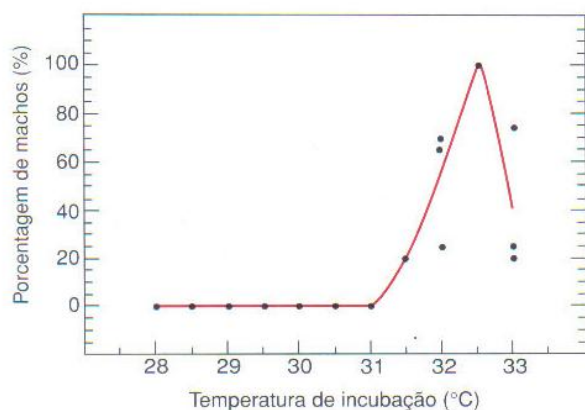
6 HERANÇA E SEXO

► A presença de áreas alternadas de pelagem preta e amarelada neste felino nos permite saber que se trata de uma fêmea.

6.1 Determinação cromossômica do sexo

A característica mais fundamental da vida é a reprodução, processo pelo qual os seres vivos têm se perpetuado em nosso planeta desde sua origem, há mais de 3 bilhões de anos. Existem duas formas básicas de reprodução: assexuada e sexuada. Na **reprodução assexuada**, um único indivíduo transmite a seus descendentes um conjunto gênico idêntico ao seu. Na **reprodução sexuada**, a cada geração, ocorre mistura entre os genes de origem materna e de origem paterna (recombinação gênica); um indivíduo transmite a seus descendentes combinações gênicas diferentes das que recebeu de seus pais. Na reprodução sexuada, duas células especializadas — os gametas —, cada uma delas contendo um conjunto gênico típico da espécie, unem-se para originar um novo ser.

Na maioria das espécies de animais, os gametas que se unem diferem em forma, tamanho e mobilidade. O gameta feminino, denominado **óvulo**, é geralmente grande e sem mobilidade própria, enquanto o masculino, denominado **espermatozóide**, é menor e com movimentos ativos. Espécies em que o mesmo indivíduo forma gametas masculinos e femininos são chamadas de **hermafroditas**, ou **monóicas** (do grego *mono*, um, e *oikos*, casa: significa "uma casa para os dois sexos"). Espécies em que há indivíduos produtores de óvulos (fêmeas) e indivíduos produtores de espermatozóides (machos) são chamadas de **dióicas** (do grego *di*, duas, e *oikos*, casa: significa "duas casas, uma para cada sexo").

A determinação do sexo nas espécies dióicas depende, em última análise, da ação de genes específicos que atuam no desenvolvimento do novo ser, fazendo com que ele se torne macho ou fêmea. Há espécies em que os genes determinadores do sexo são muito afetados pelas condições ambientais; nesse caso, o sexo do indivíduo depende das condições em que o desenvolvimento ocorre. Em crocodilos e jacarés, em muitas espécies de tartaruga e em algumas espécies de lagarto, o sexo é determinado pela temperatura em que os ovos são incubados. Nos crocodilos, por exemplo, embriões

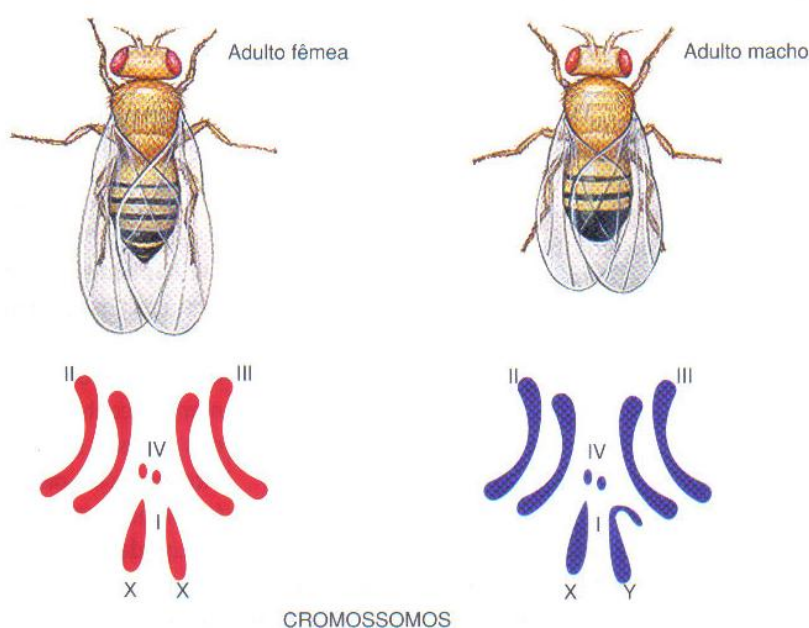
que se desenvolvem em temperaturas relativamente baixas são sempre do sexo feminino; machos são produzidos apenas se a incubação ocorre acima de 30 °C. Nas tartarugas marinhas dá-se o inverso: temperaturas mais elevadas induzem o desenvolvimento de fêmeas, e temperaturas mais baixas, de machos. **(Fig. 6.1)**

▲ **Figura 6.1** • O gráfico mostra o efeito da temperatura sobre a determinação do sexo em crocodilos. À medida que a temperatura aumenta, dentro de certos limites, aumenta a produção de machos.

Na maioria das espécies animais, o ambiente externo não influi na determinação do sexo, que é definido pela constituição cromossômica (e, portanto, genética) dos indivíduos. Nesses casos, a diferença entre machos e fêmeas reside geralmente em um par de cromossomos chamados de **cromossomos sexuais**, ou **heterossomos** (do grego *heteros*, diferente). Os outros cromossomos, que não diferem entre machos e fêmeas, são chamados de **autossomos** (do grego *autos*, próprio).

Sistemas de determinação do sexo

Sistema XY

Em muitas espécies dióicas, as fêmeas têm um par de cromossomos sexuais homólogos, enquanto os machos têm um dos cromossomos sexuais correspondente aos da fêmea e outro tipicamente masculino, sem correspondente no sexo feminino. O cromossomo sexual presente tanto em fêmeas quanto em machos é denominado **cromossomo X**. O cromossomo sexual presente apenas em machos é o **cromossomo Y**. Nessas espécies, fêmeas apresentam dois cromossomos X (**XX**) e machos apresentam um cromossomo **X** e um **Y** (**XY**). Esse tipo de determinação cromossômica do sexo, conhecido como **sistema XY**, está presente em diversos insetos (como a drosófila, por exemplo), nos mamíferos (incluindo a espécie humana), em diversas espécies de peixe, em algumas espécies de planta etc. **(Fig. 6.2)**

Nos mamíferos, a determinação do sexo masculino depende de um gene localizado no cromossomo Y, denominado ***SRY***, sigla de ***sex-determining region Y***. A proteína codificada por esse gene induz, no embrião, a formação de testículos, aparentemente por ativar outros genes em diversos cromossomos. A testosterona e outras substâncias produzidas nos testículos atuam no desenvolvimento de órgãos genitais e de outras características típicas do sexo masculino. Há casos em que o gene *SRY* sofreu mutação e, por isso, a proteína por ele codificada não é funcional. Embriões portadores dessa mutação, mesmo tendo cariótipo (conjunto de cromossomos) masculino (46, XY, no caso

► **Figura 6.2** • Acima, representação de fêmea e macho adultos da mosca *Drosophila melanogaster*. Abaixo, cariótipos de cada um dos sexos. Nessa espécie, machos e fêmeas possuem três pares de autossomos e um par de cromossomos sexuais, XX na fêmea e XY no macho.

humano), desenvolvem fenótipo feminino. Embriões de mamíferos sem cromossomo Y não possuem o gene *SRY* e desenvolvem fenótipo feminino. É o que ocorre na síndrome de Turner na espécie humana, em que as pessoas afetadas apresentam cariótipo 45, X0 (relembre as síndromes cromossômicas no capítulo 7 do volume 1).

Em drosófilas, o cromossomo **Y** apresenta genes relacionados com a produção dos espermatozóides, mas que não determinam o sexo do indivíduo. Assim, moscas com apenas um cromossomo sexual **X** apresentam fenótipo masculino, mas são estéreis em virtude da ausência do cromossomo **Y**. A determinação do sexo em drosófilas depende da relação entre as quantidades de conjuntos autossômicos e de cromossomos X presentes nas células. Se houver tantos lotes de autossomos quanto forem os lotes de cromossomos X, o fenótipo será feminino; fêmeas possuem, normalmente, dois conjuntos de autossomos e dois cromossomos X. Se a quantidade de lotes de autossomos for o dobro da quantidade de cromossomos X, o fenótipo será masculino; indivíduos com dois conjuntos de autossomos e apenas um cromossomo sexual (X) são machos fenotipicamente normais, porém estéreis.

Sistema X0

Em algumas espécies não há cromossomo **Y**; as fêmeas têm um par de cromossomos homólogos **XX**, enquanto os machos têm um cromossomo **X** único. Nessas espécies, portanto, os machos têm número ímpar de cromossomos no cariótipo, um a menos que as fêmeas. Esse sistema de determinação de sexo é denominado **X0** (lê-se "xis-zero"), sendo o zero indicativo da ausência de um cromossomo sexual. Diversas espécies de inseto, entre elas a maioria dos gafanhotos, apresentam sistema **X0** de determinação do sexo.

Sistema ZW

Aves, diversas espécies de répteis, algumas espécies de peixe e de insetos (borboletas e mariposas, por exemplo) apresentam sistema de determinação cromossômica do sexo do tipo **ZW**. Nesse sistema, machos e fêmeas diferem entre si quanto a um par de cromossomos, como no sistema XY, mas são as fêmeas que possuem o par heteromórfico, ou seja, apresentam dois cromossomos sexuais diferentes.

O cromossomo sexual presente tanto em fêmeas quanto em machos no sistema ZW é chamado de **cromossomo Z**. O cromossomo sexual presente apenas nas fêmeas é denominado **cromossomo W**. Assim, no sistema **ZW**, os machos são **ZZ** e as fêmeas, **ZW**.

Sexo homogamético e heterogamético

Nas espécies com sistemas XY e X0 de determinação do sexo, a meiose de uma célula feminina **XX** dá origem a um único tipo de gameta, portador de um lote de autossomos e um cromossomo sexual **X**. A meiose masculina, por sua vez, origina dois tipos de espermatozóides; no sistema XY, 50% dos espermatozóides têm cromossomo **X** e 50% têm cromossomo **Y**; no sistema X0, 50% têm o cromossomo sexual **X** e 50% não têm cromossomo sexual.

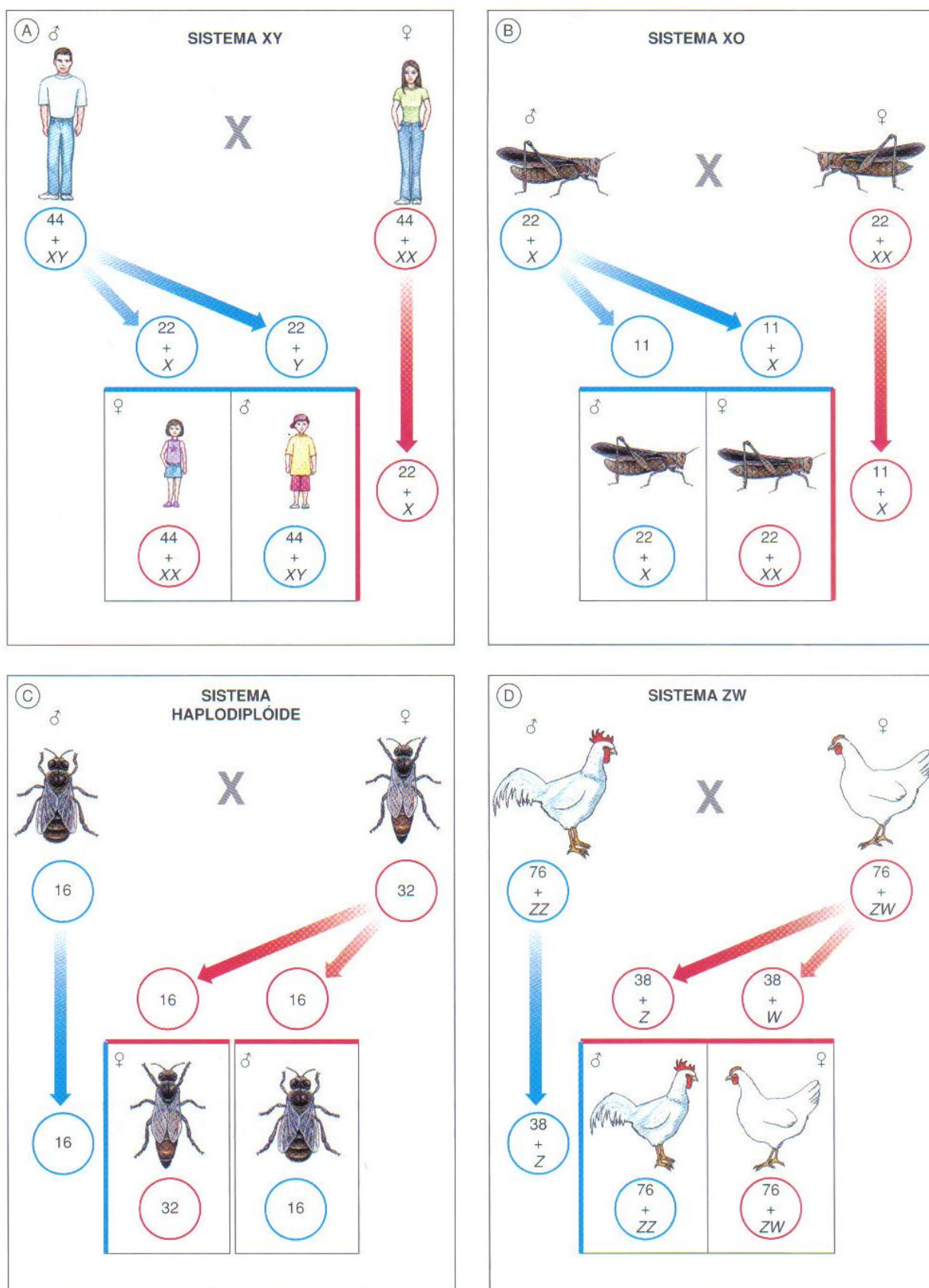
Nesses sistemas, as fêmeas formam apenas um tipo de gameta em relação ao cromossomo sexual, por isso constituem o **sexo homogamético** (do grego *homos*, igual). O sexo masculino forma dois tipos de gameta quanto aos cromossomos sexuais, sendo por isso denominado **sexo heterogamético** (do grego *heteros*, diferente).

Tanto no sistema XY quanto no sistema X0, é o genitor do sexo masculino que determina o sexo da prole. O gameta masculino portador de um cromossomo **X**, ao fecundar um óvulo (sempre portador de **X**), origina um zigoto **XX**, que se desenvolve como fêmea. O gameta masculino portador de um cromossomo **Y**, ao fecundar o óvulo, dá origem a um zigoto **XY**, que se desenvolve como macho. No sistema X0, o espermatozóide sem cromossomo sexual ("0"), ao fecundar um óvulo, origina um zigoto **X0**, que se desenvolve como macho.

No sistema **ZW**, o sexo heterogamético é o feminino, e são as fêmeas que determinam o sexo da prole. Um óvulo portador de cromossomo **Z**, ao ser fecundado por um espermatozóide (sempre portador de um cromossomo **Z**), origina um zigoto **ZZ**, que se desenvolve como macho. Um óvulo portador de cromossomo **W**, ao ser fecundado por um espermatozóide (**Z**), origina um zigoto **ZW**, que se desenvolve como fêmea. **(Fig. 6.3)**

Sistema haplóide/diplóide de determinação de sexo (haplodiploidia)

Em insetos himenópteros como abelhas e formigas, o sistema de determinação do sexo é denominado **sistema haplóide/diplóide**, ou **haplodiplóide**. Nessas espécies, machos são haplóides (n) e fêmeas, diplóides ($2n$).

Em abelhas, por exemplo, os machos, chamados de zangões, originam-se de óvulos não-fecundados, fenômeno conhecido como **partenogênese**. Sendo haplóides (n), eles são portadores de apenas um lote de cromossomos de origem exclusivamente materna. Óvulos fecundados, portanto diplóides ($2n$), originam fêmeas, que podem se desenvolver em rainhas férteis ou em operárias estéreis, dependendo do tipo de alimentação que receberem durante a fase larval.

▲ **Figura 6.3** • Diferentes sistemas de determinação cromossômica do sexo. **A.** XY (espécie humana). **B.** X0 (gafanhoto). **C.** Haplodiploidia (abelha melífera). **D.** ZW (galinha).

Recentemente, descobriu-se que o sexo masculino nas abelhas do gênero *Apis*, e provavelmente nos outros himenópteros, não é determinado diretamente pelo número de lotes cromossômicos. Os óvulos haplóides desenvolvem-se em machos porque apresentam apenas uma versão do gene conhecido como *csd* (do inglês ***c**omplementary **s**ex **d**eterminer*, determinante complementar do sexo). Esse gene possui 19 formas alélicas; se o indivíduo possuir apenas uma delas, será macho; se possuir duas versões diferentes do gene, será fêmea. Como indivíduos haplóides possuem apenas uma versão de cada gene, eles são machos. Indivíduos diplóides são geralmente heterozigóticos para o gene *csd* (devido ao grande número de combinações possíveis entre os 19 alelos) e, por isso, desenvolvem-se como fêmeas. Mais raramente forma-se um indivíduo diplóide homozigótico para o gene *csd*, que se desenvolve como macho diplóide (veja outras informações sobre esse assunto na Leitura deste capítulo).

Determinação do sexo em plantas

Em diversas espécies de plantas dióicas, o sexo é determinado de maneira semelhante à dos animais. O espinafre e o cânhamo, por exemplo, têm sistema XY de determinação do sexo; o morango silvestre segue o sistema ZW. Uma curiosidade é que a descoberta do sistema XY de determinação do sexo ocorreu originalmente em uma planta do grupo das briófitas.

6.2 Herança de genes localizados em cromossomos sexuais

Na maioria das espécies com sistema XY, o cromossomo **Y** apresenta pouquíssimos genes. O cromossomo **X**, por outro lado, possui grande quantidade de genes, envolvidos na determinação de diversas características. Fenômeno semelhante ocorre com os cromossomos **Z** e **W**, respectivamente. É por isso que indivíduos sem cromossomos **X** (ou **Z**) não conseguem sobreviver, enquanto a ausência de cromossomo **Y** (ou **W**) geralmente não afeta a sobrevivência.

Os cromossomos **X** e **Y** de mamíferos, apesar de muito diferentes em sua constituição genética, apresentam pequenas regiões homólogas nas extremidades. Isso garante, na meiose masculina, que os dois cromossomos sexuais se emparelhem pelas pontas e sejam corretamente distribuídos para as células-filhas, na primeira divisão meiótica. As permutações entre esses dois cromossomos ocorrem apenas nessas regiões homólogas, de modo que praticamente não há recombinação entre os genes do cromossomo X e do cromossomo Y.

O fato de os cromossomos sexuais praticamente não apresentarem homologia tem implicações sobre a herança de certas características e o sexo dos indivíduos. Suponha, por exemplo, um gene com dois alelos (***A*** e ***a***) localizado no cromossomo **X**, na região não-homóloga ao **Y**. As fêmeas podem apresentar três tipos de genótipo quanto a esse gene: X^AX^A, X^AX^a e X^aX^a; os machos, porém, só apresentam uma versão do gene, podendo ser X^AY ou X^aY. Por isso, em relação aos genes localizados na região do cromossomo **X** não-homóloga ao **Y**, os machos são chamados de **hemizigóticos** (do grego *hemi*, metade), pois têm apenas uma versão de cada um deles, metade do que possuem as fêmeas. As mesmas conclusões são válidas para os sistemas de determinação do sexo tipo **XX/X0** e **ZZ/ZW**. Nesses sistemas de determinação do sexo, assim como no sistema XY, os indivíduos hemizigóticos são sempre os heterogaméticos.

Os genes localizados no cromossomo **X** (ou **Z**), que não têm alelo correspondente no cromossomo **Y** (ou **W**), seguem o que se denomina **herança ligada ao cromossomo sexual** (**X** ou **Z**). Genes localizados nos autossomos, por sua vez, seguem a herança que estudamos nos capítulos anteriores, genericamente denominada **herança autossômica**.

O padrão de herança ligada ao cromossomo sexual **X** caracteriza-se pelo fato de os filhos do sexo masculino herdarem genes do cromossomo **X** apenas de sua mãe, enquanto as filhas herdam metade desses genes da mãe e metade do pai. Este, por sua vez, transmite genes localizados em seu cromossomo **X** apenas às filhas.

QUADRO 6.1 • Descoberta da herança ligada ao cromossomo X

Em 1910, Morgan descobriu um macho de drosófila com olhos brancos. Ao cruzá-lo com fêmeas de olhos marrom-avermelhados (característica selvagem), obteve uma geração F_1 constituída apenas por indivíduos de olhos selvagens.

O cruzamento entre machos e fêmeas da geração F_1 resultou em uma geração F_2 constituída por 75% de moscas de olhos selvagens e 25% de moscas de olhos brancos, o que permitiu concluir que a característica olho branco era hereditária e recessiva. Um fato, no entanto, chamou a atenção de Morgan: todos os indivíduos de olhos brancos da geração F_2 eram machos. **(Tab. 6.1)**

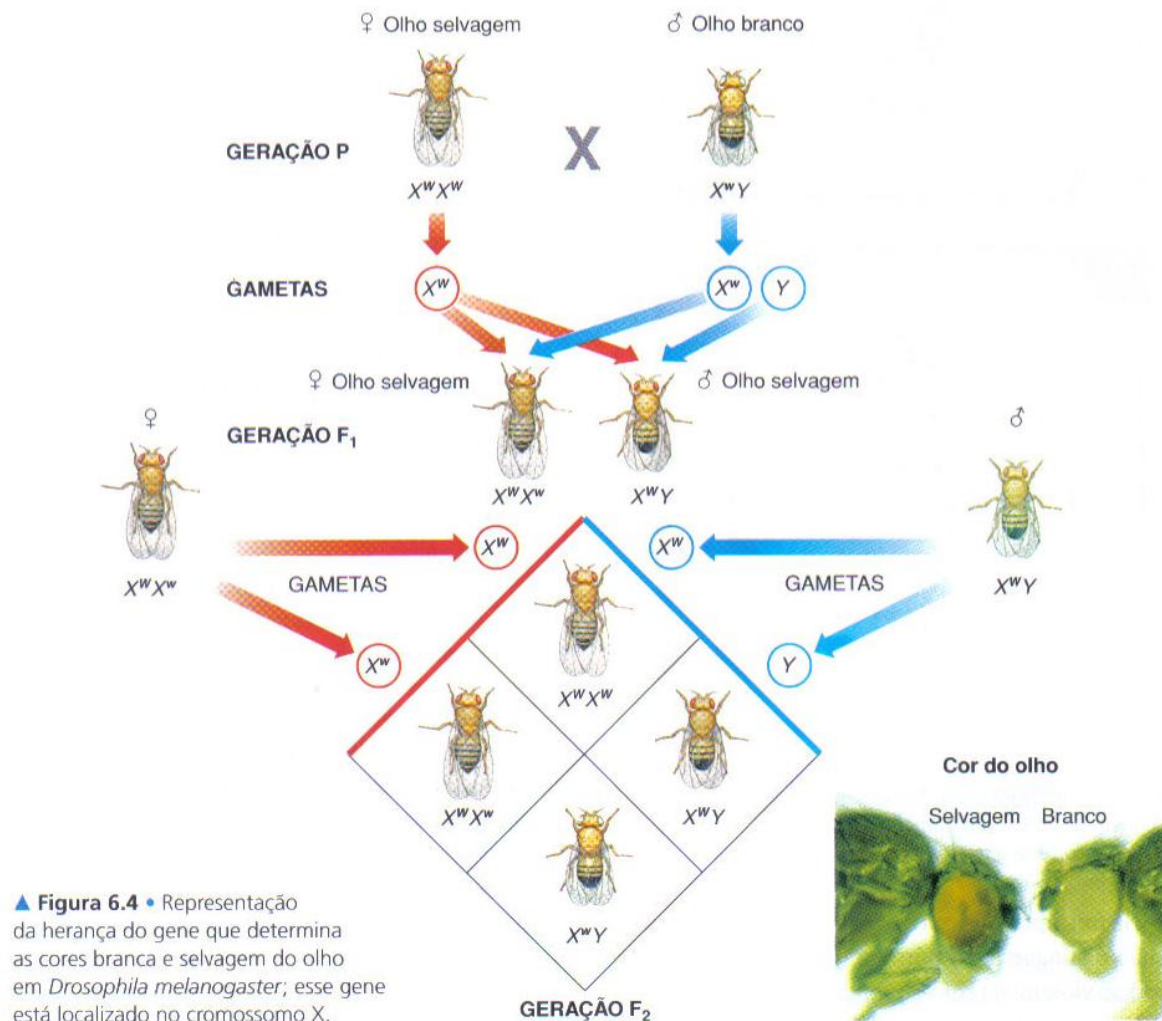
→

TABELA 6.1 • Resultado do cruzamento entre um macho de drosófila de olhos brancos e fêmeas selvagens.

Geração P	Macho de olho branco × Fêmeas selvagens	
Geração F_1	Machos e fêmeas selvagens	
Geração F_2	100% fêmeas selvagens 50% machos selvagens	3/4 selvagens
	50% machos de olhos brancos	1/4 olhos brancos

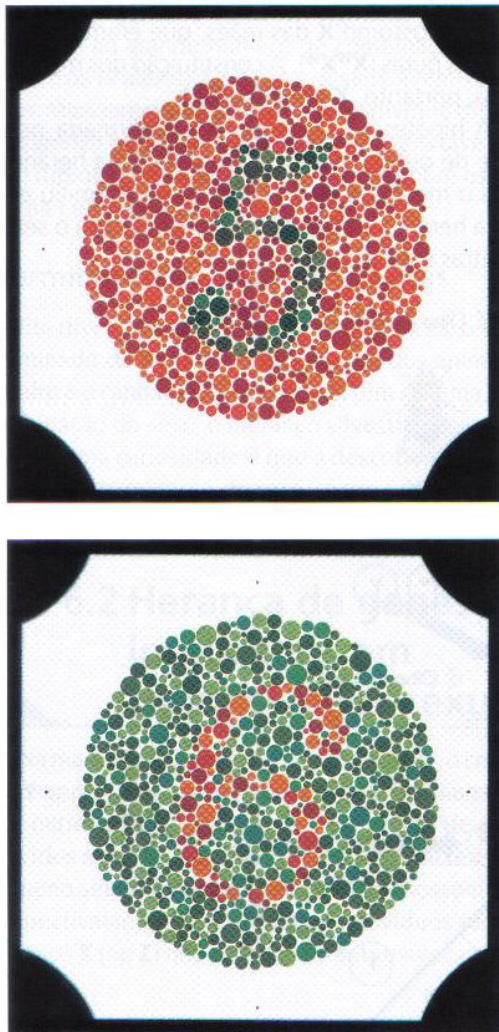
Isso indicava que a característica em questão tinha alguma relação com o sexo dos indivíduos. Ele explicou os resultados admitindo que o gene envolvido na determinação do caráter olho branco estivesse localizado no cromossomo sexual **X**.

O macho de olhos brancos que iniciou o experimento teria fornecido seu cromossomo **X**, portador do alelo recessivo mutante ***w*** (**X^w**), a todas as filhas, que receberam o outro cromossomo **X** de suas mães, portadoras apenas do alelo selvagem ***W*** (**X^W**). As fêmeas da geração F_1 seriam, portanto, heterozigóticas **X^WX^w**. Os machos F_1 receberam seu único cromossomo **X** das mães, que eram fêmeas selvagens puras (**X^WX^W**). A constituição dos machos F_1 seria, portanto, **X^WY**. **(Fig. 6.4)**

A hipótese de Morgan foi confirmada pela análise de outros genes de drosófila, cuja herança seguia o mesmo padrão. Além disso, permitiu explicar a herança de genes relacionados com o sexo em outras espécies. ■

▲ **Figura 6.4** • Representação da herança do gene que determina as cores branca e selvagem do olho em *Drosophila melanogaster*; esse gene está localizado no cromossomo X.

Alguns genes humanos com herança ligada ao cromossomo X

Daltonismo ou cegueira a cores

Cerca de 5% a 8% dos homens e 0,04% das mulheres apresentam incapacidade de distinguir as cores vermelha e verde, característica conhecida como **daltonismo**, um tipo de cegueira às cores. O termo daltonismo deriva do nome do físico inglês John Dalton (1766-1844), que apresentava essa característica. **(Fig. 6.5)**

▲ **Figura 6.5** • Diagramas utilizados para identificar o tipo mais comum de daltonismo. Pessoas de visão normal conseguem distinguir um número escrito dentro do círculo, o que não ocorre se a pessoa é daltônica.

Há três tipos básicos de cegueira às cores: I) a pessoa não distingue a cor púrpura (vermelho-escuro tendendo ao violeta) da cor vermelha; II) a pessoa vê o vermelho como se fosse verde (daltonismo); III) a pessoa não distingue o verde do vermelho, vendo essas duas cores como avermelhadas. O tipo I é condicionado por um gene recessivo localizado em um autossomo, seguindo, assim, padrão de herança autossômica. Os tipos II e III são condicionados por genes localizados no cromossomo **X**, seguindo padrão típico da herança ligada a esse cromossomo sexual.

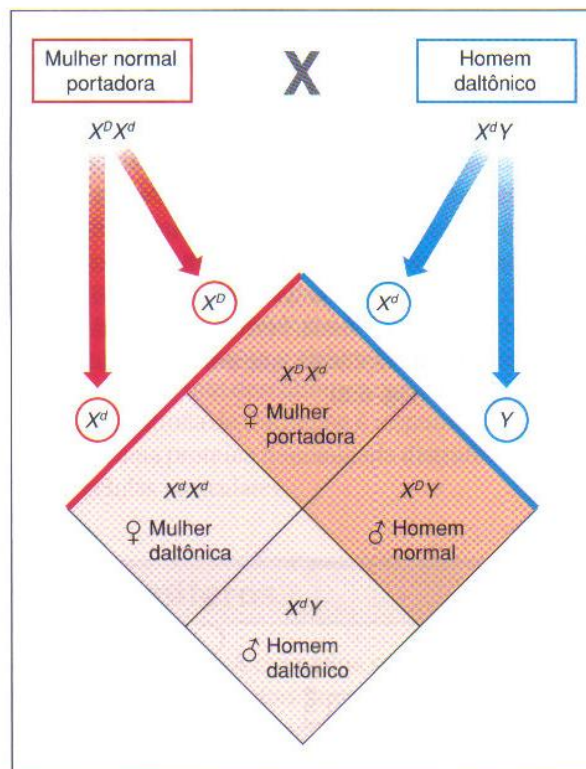
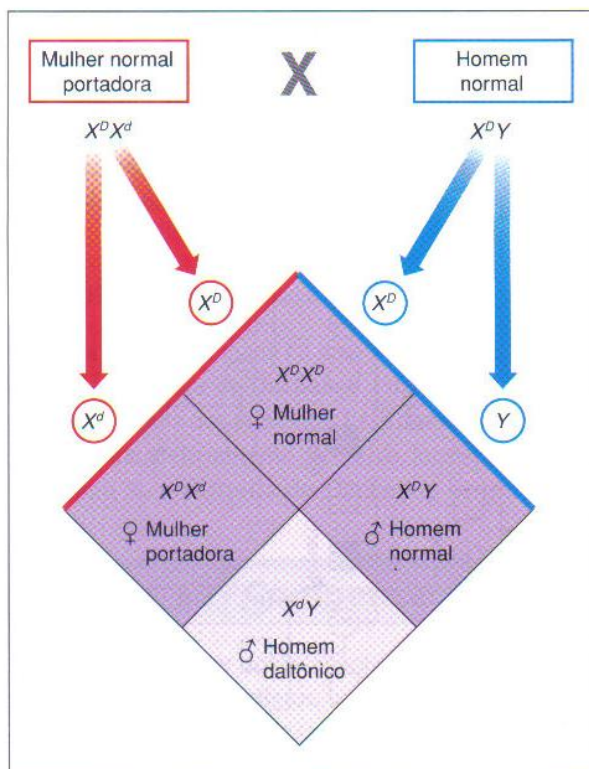
A visão em cores depende da presença de pigmentos visuais em certas células da retina, os cones. Retina é a camada sensível à luz que forra o fundo do olho. Os pigmentos retinianos são de três tipos diferentes: sensíveis ao vermelho, sensíveis ao azul e sensíveis ao verde. Cada pigmento é produzido pela ação de um gene específico, e, por mutação, surgem na população alelos alterados desses genes, incapazes de produzir um ou outro pigmento visual. O daltonismo é condicionado por um alelo mutante no cromossomo **X**, do gene responsável pela produção de um dos pigmentos visuais. Um homem hemizigótico para o alelo mutante ($\mathbf{X^dY}$) ou uma mulher homozigótica ($\mathbf{X^dX^d}$) são incapazes de distinguir o verde do vermelho (relembre o item Visão em cores, no capítulo 20 do volume 2).

Uma mulher heterozigótica ($\mathbf{X^DX^d}$) tem, em geral, visão normal, uma vez que o alelo para o daltonismo comporta-se como recessivo. Se ela transmitir o cromossomo X, portador do alelo alterado, a uma filha, esta será daltônica se seu pai também o for. Mulheres filhas de pai não-daltônico terão visão normal, pois receberão um alelo normal do pai. **(Tab. 6.2)**

TABELA 6.2 • Genótipos e fenótipos no daltonismo

Mulheres		Homens	
Genótipo	**Fenótipo**	**Genótipo**	**Fenótipo**
X^DX^D	Normal	X^DY	Normal
X^DX^d	Normal portadora	X^dY	Daltônico
X^dX^d	Daltônica		

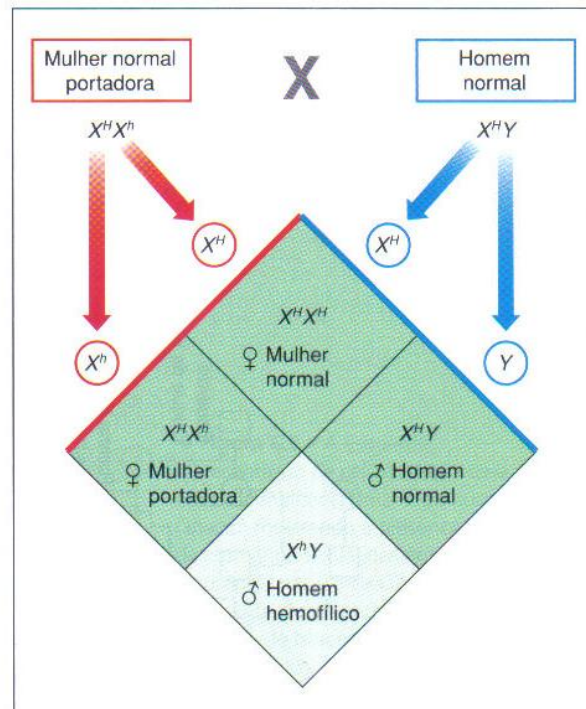
Se a mulher heterozigótica transmitir seu cromossomo **X** portador do alelo para daltonismo a um filho, ele será certamente daltônico, pois, não tendo um segundo cromossomo **X**, apresentará apenas o alelo alterado do gene. Cerca de 50% dos filhos homens de uma mulher heterozigótica para o daltonismo herdarão o cromossomo portador do alelo alterado e serão daltônicos.

Homens daltônicos, por outro lado, só transmitem seu cromossomo **X**, portador do alelo alterado, às suas filhas; aos filhos, eles transmitem o cromossomo **Y**. **(Fig. 6.6)**

▲ **Figura 6.6** • Representação da herança do daltonismo em dois tipos de casamentos: à esquerda, homem normal com mulher portadora do alelo condicionante do traço; à direita, homem daltônico com mulher portadora do alelo condicionante do traço.

Hemofilia

A **hemofilia** é uma doença hereditária em que há uma falha no sistema de coagulação do sangue, de modo que a pessoa hemofílica pode ter hemorragias abundantes mesmo em pequenos ferimentos. O mecanismo normal de coagulação do sangue compõe-se de uma série de reações controladas por proteínas denominadas fatores de coagulação, presentes no plasma sangüíneo. Os fatores de coagulação são produzidos pela ação de genes localizados tanto em autossomos quanto no cromossomo X.

Um dos tipos mais graves de hemofilia, a **hemofilia A**, é causado pela deficiência no **fator VIII** de coagulação e segue a herança ligada ao cromossomo X. O alelo normal do gene (***H***) produz fator VIII funcional e atua como dominante, condicionando fenótipo não-hemofílico; o alelo mutante (***h***), recessivo, condiciona ausência do fator VIII, sendo responsável pela hemofilia.

Homens de genótipo $\mathbf{X^hY}$ e mulheres de genótipo $\mathbf{X^hX^h}$ são hemofílicos; homens de genótipo $\mathbf{X^HY}$ e mulheres de genótipos $\mathbf{X^HX^H}$ e $\mathbf{X^HX^h}$ são, em geral, normais quanto a essa característica. A transmissão hereditária da hemofilia segue o padrão típico de herança ligada ao cromossomo X. **(Fig. 6.7)**

▲ **Figura 6.7** • Representação da herança da hemofilia no casamento de um homem normal com mulher portadora do alelo condicionante da doença.

A hemofilia ficou conhecida por ter atingido diversas pessoas da nobreza européia. Nesse caso, concluiu-se que o alelo para a hemofilia surgiu espontaneamente, por mutação de um alelo normal, nas células reprodutivas da rainha Vitória (da Inglaterra) ou em um de seus ancestrais. Esse alelo mutante foi passado para um filho e para duas filhas da rainha Vitória, e deles para outras famílias nobres da Europa. Alexis, filho do último czar da Rússia, herdou o alelo para a hemofilia da rainha Vitória, que era avó de sua mãe Alexandra. **(Fig. 6.8)**

▶ **Figura 6.8** • Árvore genealógica de parte da nobreza européia, mostrando a transmissão do alelo para a hemofilia a partir da rainha Vitória da Inglaterra (1819-1901).

Pessoas hemofílicas podem ser tratadas com injeções de fator VIII extraído do sangue de pessoas normais. Atualmente, tomam-se cuidados rigorosos na preparação dos derivados de sangue humano, pois há risco de transmissão de doenças infecciosas, como ocorreu com a aids na década de 1980.

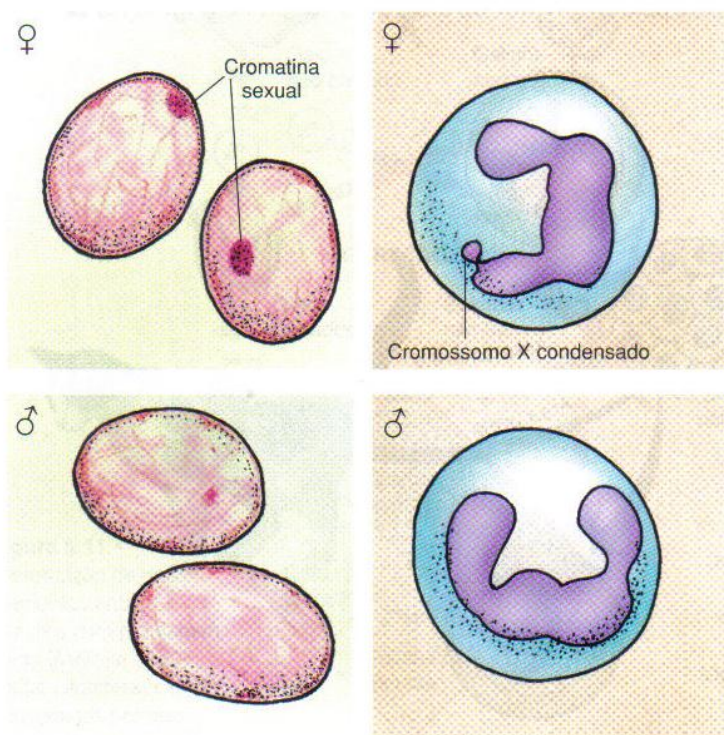
Distrofia muscular

Na espécie humana há uma doença hereditária, a **distrofia muscular de Duchenne**, em que ocorre degeneração e atrofia dos músculos. Essa doença é condicionada por um alelo mutante recessivo, localizado no cromossomo X. A distrofia de Duchenne ocorre quase exclusivamente em meninos, com uma incidência de 1 doente em cada 3.500 nascimentos.

O menino afetado pela doença começa a apresentar os sintomas da distrofia entre 2 e 6 anos. O quadro vai se agravando com a idade e, por volta dos 12 anos, a criança geralmente já está confinada a uma cadeira de rodas, raramente sobrevivendo além da adolescência. Como os homens doentes não se reproduzem, pois morrem antes de atingir a maturidade, não há mulheres homozigóticas. O cromossomo X que as mulheres recebem do pai terá sempre o alelo normal do gene.

Recentemente descobriu-se que o alelo normal do gene para distrofia de Duchenne é responsável pela produção de uma proteína denominada **distrofina**, presente nas células musculares.

QUADRO 6.2 • Compensação de dose em mamíferos

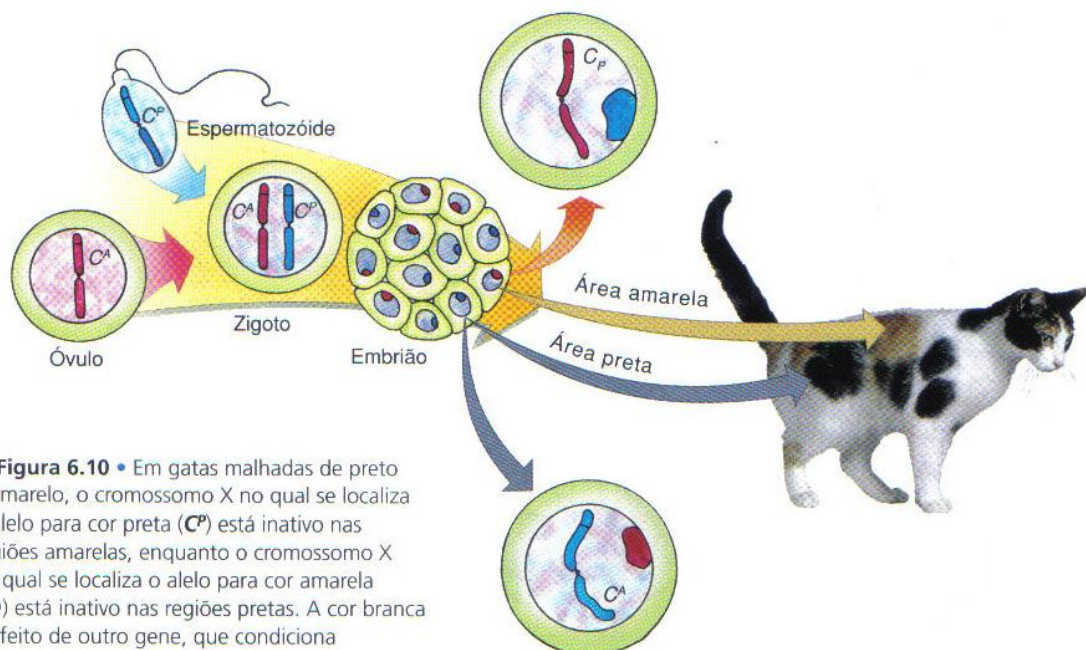
No decorrer do desenvolvimento embrionário das fêmeas de mamíferos, um de seus cromossomos **X** é inativado, em cada uma das células do organismo com exceção da linhagem germinativa. O cromossomo **X** inativo torna-se extremamente condensado e assume o aspecto de um pequeno grânulo no núcleo das células em interfase. Esse grânulo, facilmente observado em preparações de células tratadas com corantes para núcleo, recebe o nome de **cromatina sexual**. A cromatina sexual permite diferenciar células dos dois sexos, uma vez que as células femininas são "cromatina sexual positivas", enquanto as células masculinas são "cromatina sexual negativas". Esses exames já foram empregados em competições esportivas de alto nível, quando houve suspeita de que o sexo de uma atleta não correspondia à categoria feminina, em que ela estava inscrita. **(Fig. 6.9)** →

◀ **Figura 6.9** • À esquerda, representação de células de mucosa bucal de mulher (acima) e de homem (abaixo) mostrando a presença de cromatina sexual nas primeiras e ausência nas últimas. À direita, representação de neutrófilo de mulher (acima) e de homem (abaixo); em neutrófilos, o cromossomo X inativo forma, freqüentemente, uma pequena projeção nuclear conhecida como baqueta, a qual está presente em células femininas, mas não na masculina.

Os cientistas admitem que a condensação de um dos cromossomos **X** das fêmeas seja uma estratégia para inativar os genes nele contidos, igualando assim a quantidade de genes ativos em fêmeas e em machos. Esse mecanismo, conhecido por **compensação de dose**, compensaria a dose dupla de genes do cromossomo **X** das fêmeas em relação à dose simples desses genes nos machos. Essa idéia foi proposta originalmente pela pesquisadora inglesa Mary Lyon em 1961, sendo também conhecida como **hipótese de Lyon**.

Um fato interessante é que a inativação do cromossomo **X**, que ocorre em determinada etapa do desenvolvimento embrionário, persiste ao longo das divisões celulares. Isso quer dizer que, se em uma célula embrionária foi inativado o cromossomo **X** de origem paterna, todas as células descendentes terão esse mesmo cromossomo inativo. Como a inativação ocorre ao acaso, podendo ser inativado tanto o cromossomo **X** materno quanto o cromossomo **X** paterno, o corpo de uma fêmea de mamífero é comparável a um mosaico: em certas regiões, está ativo o cromossomo **X** de origem materna; em outras, está ativo o cromossomo **X** de origem paterna.

A conseqüência dessa inativação aleatória do cromossomo **X** é que as fêmeas heterozigóticas para genes localizados no cromossomo **X** expressam um dos alelos em certas regiões do corpo, e o outro alelo nas demais regiões. Isso explica, por exemplo, o fato de algumas mulheres heterozigóticas para o gene do daltonismo ($\mathbf{X}^D\mathbf{X}^d$) terem visão normal em um dos olhos e serem daltônicas para o outro. Nesse caso, o cromossomo **X** ativo nas células de um dos olhos é portador do alelo que condiciona visão normal ($\mathbf{X}^D$); no outro olho, o cromossomo **X** ativo é o que apresenta o alelo para daltonismo ($\mathbf{X}^d$) e, conseqüentemente, o olho é daltônico.

Mulheres heterozigóticas para o gene da hemofilia ($\mathbf{X}^H\mathbf{X}^h$) têm, geralmente, cerca de metade da quantidade de fator de coagulação em relação às mulheres homozigóticas para o alelo normal. Isso ocorre porque em cerca de metade das células produtoras desse fator o cromossomo **X** inativado é o portador do alelo normal ($\mathbf{X}^H$), enquanto na outra metade o inativo é o portador do alelo mutante ($\mathbf{X}^h$).

A inativação aleatória do cromossomo **X** das fêmeas de mamíferos é bem evidente em certas linhagens de gatos domésticos. Nesses animais, pelagem preta e pelagem amarela são condicionadas por alelos de um gene localizado no cromossomo **X**. Como os machos têm somente um cromossomo **X**, eles nunca têm essas duas cores simultaneamente, pois apresentam apenas um ou outro alelo. As fêmeas heterozigóticas são geralmente malhadas, com partes do corpo pretas e partes amarelas. A explicação para esse fato é que, nas regiões pretas, o cromossomo **X** inativado é o portador do alelo para amarelo, enquanto nas regiões amarelas o cromossomo **X** inativado é o portador do alelo para cor preta. **(Fig. 6.10)**

▲ **Figura 6.10** • Em gatas malhadas de preto e amarelo, o cromossomo X no qual se localiza o alelo para cor preta (*C^P*) está inativo nas regiões amarelas, enquanto o cromossomo X no qual se localiza o alelo para cor amarela (*C^A*) está inativo nas regiões pretas. A cor branca é efeito de outro gene, que condiciona variegação da pelagem.

Herança ligada ao cromossomo sexual em aves

Os genes localizados no cromossomo **Z** de aves têm comportamento semelhante ao dos localizados no cromossomo **X**, que acabamos de ver, mas com padrão de herança inverso, pois, como vimos, nas aves o sexo heterogamético é o feminino.

Um caso de herança ligada ao cromossomo sexual em galinhas é o da presença ou ausência de listras (ou barras) nas penas. O gene responsável por essa característica localiza-se no cromossomo **Z** e apresenta dois alelos, um dominante ($\mathbf{Z^B}$), que condiciona plumagem barrada (carijó), e um recessivo ($\mathbf{Z^b}$) condicionante de plumagem não-barrada.

Os genótipos de machos e fêmeas podem ser os seguintes:

Machos (galos)		Fêmeas (galinhas)	
Genótipos	**Fenótipos**	**Genótipos**	**Fenótipos**
$\mathbf{Z^B\ Z^B}$	Barrado	$\mathbf{Z^B\ W}$	Barrada
$\mathbf{Z^B\ Z^b}$	Barrado	$\mathbf{Z^b\ W}$	Não-barrada
$\mathbf{Z^b\ Z^b}$	Não-barrado		

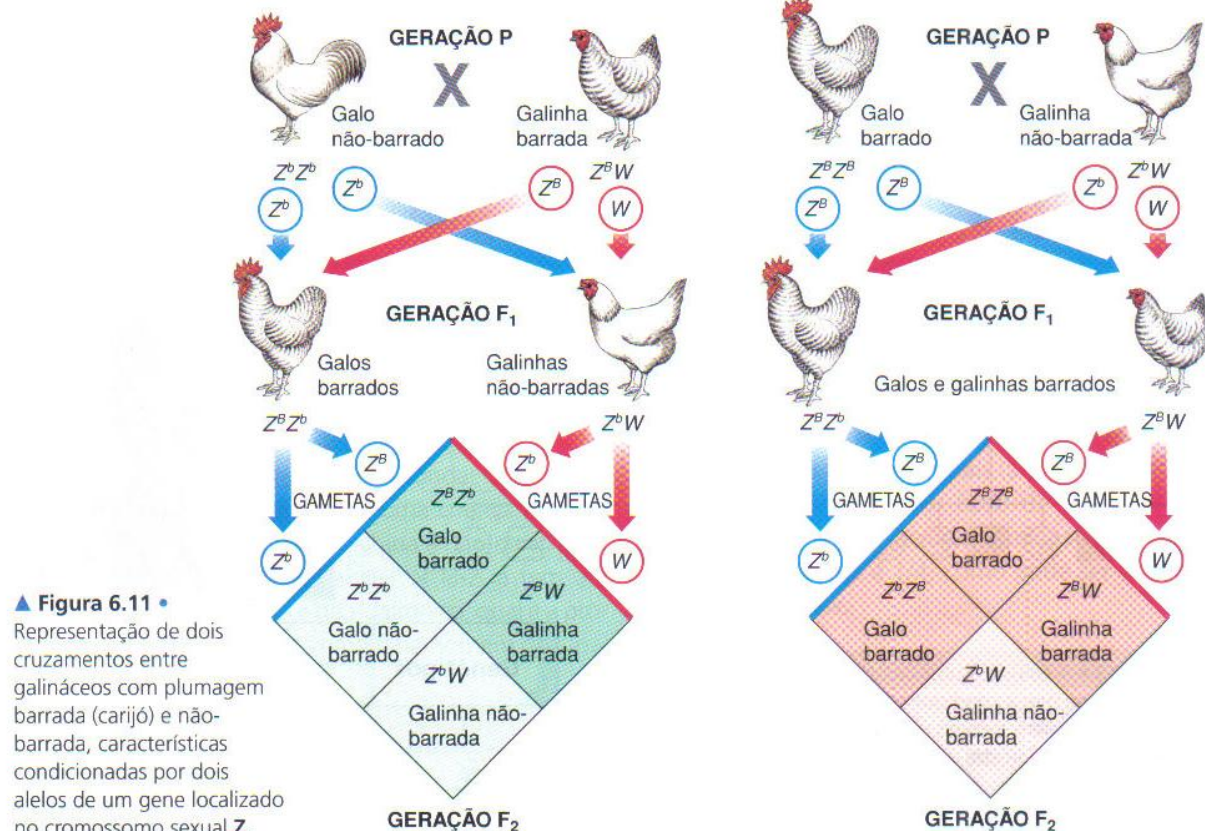
O cruzamento de um macho não-barrado ($\mathbf{Z^bZ^b}$) com uma fêmea barrada ($\mathbf{Z^BW}$) produz machos barrados ($\mathbf{Z^BZ^b}$) e fêmeas não-barradas ($\mathbf{Z^bW}$). O cruzamento desses indivíduos F_1 entre si produz 25% de machos carijós ($\mathbf{Z^BZ^b}$), 25% de machos não-barrados ($\mathbf{Z^bZ^b}$), 25% de fêmeas barradas ($\mathbf{Z^BW}$) e 25% de fêmeas não-barradas ($\mathbf{Z^bW}$).

Os resultados são diferentes quando os pais são machos barrados de linhagem pura ($\mathbf{Z^BZ^B}$) e fêmeas não-barradas ($\mathbf{Z^bW}$). Nesse caso, 100% do descendentes, tanto machos ($\mathbf{Z^BZ^b}$) quanto fêmeas ($\mathbf{Z^BW}$), são barrados. O cruzamento desses indivíduos F_1 entre si produz 100% de machos barrados, sendo metade homozigóticos ($\mathbf{Z^BZ^B}$) e metade heterozigóticos ($\mathbf{Z^BZ^b}$). As fêmeas de F_2 são de dois tipos: barradas ($\mathbf{Z^BW}$) e não-barradas ($\mathbf{Z^bW}$), sendo metade de cada tipo. **(Fig. 6.11)**

6.3 Outros tipos de herança relacionada ao sexo

Herança ligada ao cromossomo Y: genes holândricos

Na espécie humana, os poucos genes localizados no cromossomo Y são herdados apenas pelos homens, passando diretamente de pai para filho; são, por isso, denominados **genes holândricos** (do grego *holos*, com-

▲ **Figura 6.11** • Representação de dois cruzamentos entre galináceos com plumagem barrada (carijó) e não-barrada, características condicionadas por dois alelos de um gene localizado no cromossomo sexual **Z**.

pletamente, e *andros*, masculino). Alguns autores chamam a herança dos genes localizados no cromossomo Y de **herança restrita ao sexo**, uma vez que esses genes estão presentes apenas em indivíduos do sexo masculino. O gene *SRY* mencionado anteriormente, que desencadeia a diferenciação do testículo nos embriões de mamíferos, é um exemplo de gene holândrico.

Genes com expressão limitada ao sexo

Alguns genes, apesar de estarem localizados em autossomos e, portanto, presentes em ambos os sexos, expressam-se apenas em um deles. A expressão desses genes é, em geral, controlada pela presença ou ausência de hormônios de um ou de outro sexo. Um exemplo de gene com expressão limitada ao sexo na espécie é o que condiciona **hipertricose auricular** (do grego *hiper*, excesso, e *trichos*, pêlos), presença de longos pêlos nas orelhas. Até pouco tempo atrás achava-se que esse gene estivesse localizado no cromossomo Y, sendo, portanto, um gene holândrico. Estudos recentes, porém, sugerem que o gene responsável por essa característica localiza-se em um autossomo. **(Fig. 6.12)**

Figura 6.12 • A presença abundante de pêlos na orelha, traço conhecido como hipertricose auricular, é um exemplo de gene com expressão limitada ao sexo masculino.

Os genes envolvidos na produção de leite em mamíferos são outros exemplos de genes com expressão limitada ao sexo. Em gado bovino, por exemplo, conhece-se diversos genes que influem na maior ou menor produção de leite. Um touro de uma raça produtora de leite transmitirá genes para essa característica a seus descendentes. No entanto, esses genes não se expressam no touro, que, apesar de tê-los, não produz leite.

Genes com expressão influenciada pelo sexo

Alguns genes expressam-se em ambos os sexos, porém de maneira diferente. Um exemplo é o gene que condiciona a **calvície** hereditária na espécie humana, característica muito mais comum em homens que em mulheres. Nestas, além de rara, a calvície manifesta-se mais como uma diminuição generalizada do número de fios em todo o couro cabeludo, em vez de como uma perda total do cabelo do topo da cabeça, o que geralmente ocorre em homens.

A partir da análise de heredogramas familiares, chegou-se à conclusão de que o padrão de herança da calvície pode ser explicado por um alelo autossômico que se comporta como **dominante no homem** — basta ter um deles para ser calvo — e **recessivo na mulher**, pois somente mulheres homozigóticas para o gene são calvas. Essa diferença no comportamento do gene é determinada pelo ambiente hormonal do corpo da pessoa: o alelo **C** só atua como dominante na presença de hormônios masculinos. **(Fig. 6.13)**

Genótipos	Fenótipos	
	Homem	Mulher
CC	Calvo	Calva
Cc	Calvo	Não-calva
cc	Não-calvo	Não-calva

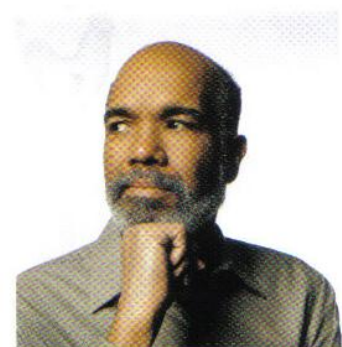
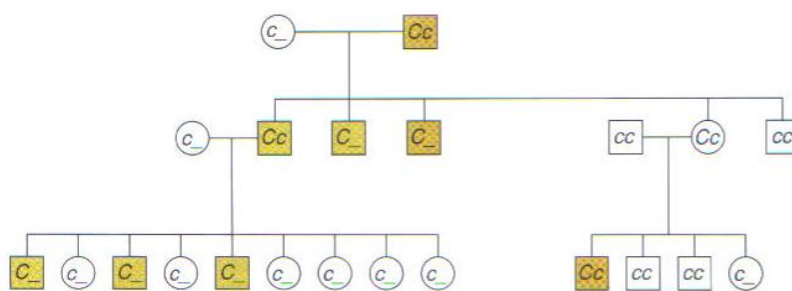



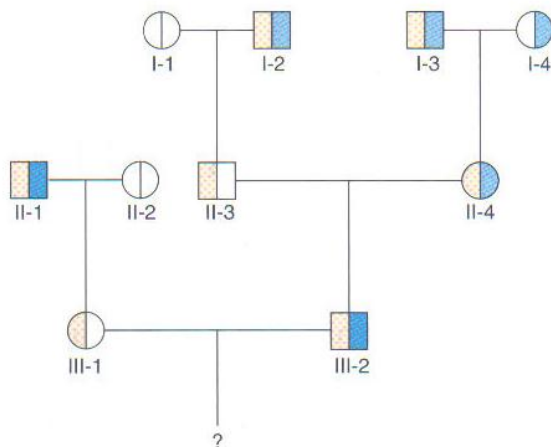
Figura 6.13 • A calvície é uma característica influenciada pelo sexo. O gene que a condiciona comporta-se como dominante nos homens e como recessivo nas mulheres. A árvore genealógica mostra a herança da calvície em uma família. Os homens representados em marrom ficaram calvos antes de atingir a idade de 35 anos.

QUADRO 6.3 • Resolução de problema: herança ligada ao cromossomo X

Genes com herança autossômica segregam-se independentemente de genes com herança ligada ao cromossomo X, pois se encontram em cromossomos diferentes. Para exercitar essa compreensão, o problema a seguir considera, simultaneamente, um traço com herança autossômica e outro com herança ligada ao cromossomo X.

O problema

O albinismo tipo I na espécie humana tem herança autossômica, sendo condicionado por um alelo recessivo. O daltonismo tem herança ligada ao cromossomo X.

No heredograma a seguir, os indivíduos de uma família estão representados divididos em duas metades; a da esquerda indica o fenótipo para a pigmentação da pele (normal ou albino), e a da direita, o fenótipo para a visão em cores (normal ou daltônico).

Analise a genealogia e responda:

a) Qual é a probabilidade de uma criança filha do casal III-1 × III-2 vir a ser albina e não-daltônica?

b) Sabendo-se que o casal III-1 × III-2 já tem um filho homem albino e não-daltônico, qual é a probabilidade de um próximo filho homem do casal ser albino e daltônico?

A solução

O primeiro passo consiste em determinar os genótipos possíveis dos indivíduos da genealogia. Indivíduos com pigmentação normal têm pelo menos um alelo dominante ***A***, podendo ser homozigóticos ***AA*** ou heterozigóticos ***Aa***. Se um indivíduo com pigmentação normal teve algum descendente albino, ou se um de seus genitores é albino, ele é certamente heterozigótico. Indivíduos albinos são homozigóticos recessivos ***aa***.

Homens com visão normal têm genótipo X^DY, enquanto homens daltônicos são X^dY. Mulheres com visão normal têm pelo menos um alelo normal X^D, podendo ser homozigóticas X^DX^D ou heterozigóticas X^DX^d. Se uma mulher com visão normal teve um filho daltônico, ou se é filha de pai daltônico, será certamente heterozigótica. As mulheres daltônicas são homozigóticas recessivas X^dX^d.

Com base nessas premissas, os genótipos dos diversos indivíduos são:

I - 1 = ***aa*** X^DX-

I - 2 = ***A_*** X^dY

I - 3 = ***A_*** X^dY

I - 4 = ***aa*** X^dX^d

II - 1 = ***A_*** X^dY

II - 2 = ***aa*** X^DX-

II - 3 = ***Aa*** X^DY

II - 4 = ***Aa*** X^dX^d

III - 1 = ***Aa*** X^DX^d

III - 2 = ***A_*** X^dY

A primeira pergunta do problema refere-se à possibilidade de o casal III-1 × III-2 vir a ter uma criança albina e não-daltônica. O genótipo de III-1 foi determinado como sendo ***Aa*** X^DX^d. O homem III-2 é X^dY, mas pode ser tanto homozigótico ***AA*** quanto heterozigótico ***Aa***. Assim, uma criança filha desse casal só será albina se III-2 for heterozigótico ***Aa***; essa probabilidade é estimada em 2/3, uma vez que seus pais (II-3 e II-4) são ambos heterozigóticos. No caso de III-2 ser heterozigótico, a chance de uma criança sua filha com III-1 vir a ser albina é 1/4, como pode ser visto no esquema a seguir.

Pais		*Aa* × *Aa*		
Gametas	1/2 *A* : 1/2 *a*		1/2 *A* : 1/2 *a*	
Filhos	1/4 *AA* :	1/4 *Aa* :	1/4 *aA* :	1/4 *aa*
	3 normais			: 1 albino →

A probabilidade de uma criança filha do casal III-1 × III-2 ter visão normal é 1/2, como pode ser visto no esquema a seguir.

Pais	X^DX^d × X^dY			
Gametas	1/2 X^D : 1/2 X^d		1/2X^d : 1/2Y	
Filhos	1/4 X^DX^d :	1/4 X^dX^d :	1/4 X^DY :	1/4 X^dY
	Mulher normal	Mulher daltônica	Homem normal	Homem daltônico

A probabilidade conjunta de uma criança ser albina e não-daltônica é de 1/4 × 1/2 = 1/8, isso assumindo-se que o indivíduo III-2 seja heterozigótico; como não temos certeza disso, estimamos essa probabilidade em 2/3, sendo necessário, então, multiplicar 1/8 × 2/3 = 2/24. A probabilidade calculada em resposta à primeira questão é, portanto, **1/12**.

Como na segunda pergunta admite-se que o casal já teve um primeiro filho albino e não-daltônico, temos certeza de que o genótipo de III-2 é **AaX^dY**. Calculamos, então, a probabilidade de um filho homem do casal **AaX^DX^d** × **AaX^dY** ser albino e daltônico. Como o problema se refere a um filho homem, deve-se excluir a descendência feminina do cálculo. Assim, a probabilidade de um filho do referido casal vir a ser albino é 1/4, e a probabilidade de ser daltônico é 1/2. A probabilidade conjunta desses dois eventos é 1/4 × 1/2 = **1/8**.

LEITURA

O MISTÉRIO SEXUAL DAS ABELHAS FINALMENTE ESCLARECIDO

Nas abelhas, os machos não têm pai, as rainhas são promíscuas e os apicultores lutam para desenvolver linhagens puras; agora finalmente entendemos por quê

A descoberta abre caminho para se entender a biologia das abelhas em um nível mais aprofundado

Foi em 1845 que o padre polonês Johann Dzierzon descobriu que os machos de abelha não têm pai. Os ovos não-fertilizados, que contêm apenas um conjunto de cromossomos (haplóides), desenvolvem-se em machos. Ovos fertilizados, com dois conjuntos cromossômicos (diplóides), originam fêmeas. Formigas e vespas têm o mesmo sistema de determinação de sexo, mas como esse sistema funciona tem sido um mistério.

Ocasionalmente ocorrem erros e um ovo fertilizado desenvolve-se em um macho diplóide, cujos descendentes são estéreis. Agora, graças a 13 anos de análise desses animais, um grupo de pesquisadores liderados por Robert Page da Universidade da

Califórnia em Davis [nos EUA] encontraram o gene envolvido. Denominado *csd* (do inglês, *complementary sex determiner*, determinante complementar do sexo), esse gene atua de modo completamente diferente de tudo que os geneticistas descobriram até agora, diz Page.

"O gene *csd* atua de modo completamente diferente de tudo que os geneticistas descobriram até agora"

Parecem existir cerca de 19 versões diferentes do gene. Apesar das dúvidas, o grupo de pesquisadores demonstrou que, se são herdadas duas versões diferentes do gene *csd*, as proteínas codificadas por elas combinam-se para desencadear o desenvolvimento de uma fêmea. Um ovo não-fertilizado, com apenas uma cópia do *csd*, desenvolve-se em um macho.

O sistema falha quando um ovo fertilizado herda duas cópias da mesma versão do gene, resultando em um macho diplóide. Esses animais são, em geral, destruídos por suas irmãs ainda no estágio de larva.

"Essa descoberta é um marco", diz Gene Robinson, um entomologista da Universidade de Illinois, em Urbana-Champaign. "Ela abre caminho para se entender a biologia das abelhas em um nível mais aprofundado."

Por exemplo, o fato de as fêmeas copularem com muitos machos garante que elas encontrarão parceiros com versões do gene *csd* diferentes das suas, o que evitaria a produção de machos diplóides inúteis. E as tentativas dos apicultores de criar linhagens puras têm falhado provavelmente porque não há diversidade suficiente do gene *csd* nas linhagens que eles criam. No futuro, talvez seja possível para os apicultores analisar seus estoques de abelhas para garantir a existência de diversidade suficiente do gene *csd* para manter férteis as colméias.

- **Fonte:** Philip Cohen. Honeybee sex mystery solved at last. *New Scientist*, vol. 179, 2410, p. 13.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

6.1 Determinação cromossômica do sexo

1. De que modo ocorre a determinação do sexo em animais como os crocodilos?
2. O que são cromossomos sexuais? E autossomos?
3. Qual é a diferença cromossômica entre machos e fêmeas no sistema XY de determinação do sexo?
4. Explique a importância do cromossomo Y na determinação do sexo em mamíferos.
5. Explique como ocorre a determinação do sexo na mosca drosófila e qual é o papel do cromossomo Y nessa espécie.
6. Descreva brevemente o sistema X0 de determinação do sexo.
7. Caracterize o sistema ZW de determinação do sexo.
8. Conceitue sexo homogamético e sexo heterogamético. Exemplifique.
9. Explique sucintamente como se dá a determinação do sexo em abelhas.

6.2 Herança de genes localizados em cromossomos sexuais

10. O que se entende por indivíduo hemizigótico?
11. Conceitue herança ligada ao cromossomo sexual e herança autossômica.
12. Construa uma tabela que relacione fenótipos e genótipos no caso do daltonismo.
13. Conceitue hemofilia tipo A e seu modo de herança.

Quadro 6.2 Compensação de dose em mamíferos

14. O que é cromatina sexual?
15. O que significa "compensação de dose"? Qual é sua relação com a cromatina sexual?
16. Explique sucintamente a origem da cor variegada preta e amarela da pelagem de certas gatas.

Quadro 6.3 Outros tipos de herança relacionada ao sexo

17. Conceitue genes holândricos, exemplificando.
18. O que são genes com expressão limitada ao sexo? Exemplifique.
19. O que são genes com expressão influenciada pelo sexo? Exemplifique.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 20 e 21.

a) autossomos
b) cromômeros
c) cromossomos homólogos
d) cromossomos sexuais

20. Quais das estruturas mencionadas permitem diferenciar os dois sexos em diversas espécies?
21. Como são denominados os cromossomos que não variam entre os sexos?

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 22 e 23.

a) sexo homogamético
b) sexo heterogamético
c) sexo masculino
d) sexo feminino

22. Como se denomina o sexo que forma dois tipos diferentes de gameta quanto aos cromossomos sexuais?
23. Como se denomina o sexo que forma apenas um tipo de gameta quanto aos cromossomos sexuais?
24. Gene holândrico é um termo utilizado para designar genes localizados
    a) na cromatina sexual.
    b) no cromossomo X.
    c) no cromossomo Y.
    d) nos autossomos.
25. Cromatina sexual refere-se
    a) ao cromossomo Y condensado no espermatozóide.
    b) ao cromossomo X condensado no óvulo.
    c) ao cromossomo X dos machos condensado durante a interfase.
    d) a um dos cromossomos X das fêmeas condensado durante a interfase.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 26 a 28.

a) dois tipos de óvulo e um tipo de espermatozóide.
b) dois tipos de óvulo e dois tipos de espermatozóide.
c) um tipo de óvulo e um tipo de espermatozóide.
d) um tipo de óvulo e dois tipos de espermatozóide.

26. Que tipos de gameta, com relação aos cromossomos sexuais, produz uma espécie com sistema de determinação do sexo do tipo XY?
27. Que tipos de gameta, com relação aos cromossomos sexuais, produz uma espécie com sistema de determinação do sexo do tipo X0?
28. Que tipos de gameta, com relação aos cromossomos sexuais, produz uma espécie com sistema de determinação do sexo do tipo ZW?
29. Em uma espécie de gafanhoto, as fêmeas possuem 20 cromossomos nas células dos gânglios nervosos. Sa-

bendo-se que nessa espécie o sistema de determinação do sexo é do tipo X0, espera-se que

a) 100% dos óvulos tenham 10 cromossomos e que 100% dos espermatozóides tenham 9 cromossomos.
b) 100% dos óvulos e 100% dos espermatozóides tenham 10 cromossomos.
c) 100% dos óvulos e 50% dos espermatozóides tenham 10 cromossomos, e que 50% dos espermatozóides tenham 9 cromossomos.
d) 100% dos espermatozóides e 50% dos óvulos tenham 10 cromossomos, e que 50% dos óvulos tenham 9 cromossomos.

30. Considere duas espécies, uma com sistema de determinação do sexo do tipo XY e outra com sistema do tipo ZW. Quem determina o sexo da prole é

a) a fêmea em ambos os casos.
b) a fêmea no primeiro caso e o macho no segundo.
c) o macho em ambos os casos.
d) o macho no primeiro caso e a fêmea no segundo.

31. Um homem é heterozigótico para um gene autossômico (*Bb*) e portador de um alelo recessivo *d* ligado ao cromossomo X. Que proporção de seus espermatozóides será *bd*?

a) zero;
b) 1/2;
c) 1/4;
d) 1/8;
e) 1/16.

QUESTÕES DISCURSIVAS

32. Em uma espécie de animal, fêmeas de coloração preta provenientes de uma linhagem pura foram cruzadas com machos de coloração cinza também puros, produzindo, em F_1, machos e fêmeas de coloração preta. Quando os indivíduos F_1 foram cruzados entre si, todas as fêmeas F_2 apresentaram coloração preta, enquanto os machos eram de dois tipos: 50% pretos e 50% cinza. Explique como se pode determinar qual dos sexos é heterogamético e qual é homogamético.

33. Considere o sistema XY de determinação do sexo para a espécie humana. Qual é a probabilidade de uma criança do sexo masculino apresentar simultaneamente um cromossomo X de origem da avó materna e um cromossomo Y de origem do avô paterno?

34. A hemofilia A é uma doença que se caracteriza pelo retardo no tempo de coagulação do sangue. Essa doença está presente nos cachorros (e também na espécie humana) e é condicionada por um alelo recessivo (*h*), localizado no cromossomo X.

a) Se um cachorro macho hemofílico for cruzado com uma fêmea homozigótica não-hemofílica, qual é a proporção esperada de machos e fêmeas normais e hemofílicos, na prole, e quais são os diferentes genótipos apresentados por esses indivíduos?
b) Se uma das fêmeas produzidas nesse cruzamento for cruzada com um cachorro normal, qual será a proporção esperada de indivíduos normais e hemofílicos entre machos e fêmeas da prole e quais serão os diferentes genótipos desses indivíduos?

Observação: A determinação do sexo em cachorro é semelhante à da espécie humana (sistema XY).

35. O daltonismo (cegueira para cores) é condicionado por um alelo recessivo ligado ao sexo. Uma mulher normal, cujo pai era daltônico, casa-se com um homem daltônico. Pergunta-se:

a) Quais são os possíveis genótipos da mãe da mulher? E da mãe do homem?
b) Qual é a probabilidade de que um filho homem do casal seja daltônico?
c) Que porcentagem de mulheres daltônicas se pode prever entre as filhas desse casal?
d) Que porcentagem de filhos (homens e mulheres) normais se pode prever entre os descendentes desse casal?

36. O daltonismo é produzido pelo alelo *d*, recessivo e ligado ao X. A hemofilia é produzida pelo alelo *h*, recessivo e também ligado ao X. Uma mulher não-daltônica e não-hemofílica, porém portadora do alelo para hemofilia, filha de pai daltônico e normal para hemofilia, casa-se com um homem de genótipo idêntico ao de seu pai. Responda:

a) Se admitirmos, para esse caso, que a freqüência de permutação entre os locos considerados é da ordem de 20%, qual é a probabilidade de um filho do casal ser (sem levar em conta o sexo) normal para ambas as características?
b) Com base nas mesmas informações anteriores, qual é a probabilidade de um filho homem do casal vir a ser daltônico e hemofílico?

37. O alelo *m* (*miniature*) que determina asas curtas em *Drosophila melanogaster* é recessivo e ligado ao cromossomo X. Seu alelo dominante *M* determina a formação de asas longas. Que freqüências fenotípicas se podem prever nos seguintes cruzamentos:

a) macho de asas curtas × fêmeas de asas curtas;
b) fêmea de asas curtas × machos de asas longas;
c) fêmea de asas longas (homozigótica) × macho de asas curtas;
d) fêmea de asas longas (heterozigótica) × macho de asas longas;
e) fêmea de asas longas (heterozigótica) × macho de asas curtas.

38. Em galináceos, o sistema de determinação de sexo é ZW. O alelo dominante *B*, localizado no cromossomo sexual, produz penas com padrão barrado. O seu alelo recessivo *b* produz penas de cor uniforme, quando em condição homozigótica. O alelo autossômico dominante *R* produz crista com forma rosa, e seu alelo recessivo *r* produz crista com forma simples, quando em condição homozigótica. Uma fêmea de penas barradas, homozigótica para crista com forma rosa, é cruzada com um macho de penas de cor uniforme e crista com forma simples. Qual é a proporção fenotípica esperada na geração F_1?

39. A distrofia muscular Duchenne é ligada ao cromossomo X e geralmente só afeta os homens. A doença manifesta-se na infância; as vítimas enfraquecem progressivamente e morrem antes da adolescência.

a) Qual é a probabilidade de uma mulher cujo irmão sofre de Duchenne ter um descendente do sexo masculino afetado?

b) Supondo que um tio materno (irmão da mãe) de uma mulher teve Duchenne, qual é a probabilidade de a mulher ter recebido o alelo?

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

40. (UFSM) Considere as afirmações:

I. Em humanos, a determinação do sexo cromossômico do zigoto (XX ou XY) depende do gameta masculino que fecunda o óvulo.

II. Em mamíferos, as fêmeas possuem apenas um cromossomo X e os machos, dois.

III. Em mamíferos, nas células somáticas de fêmeas normais, é possível observar o cromossomo X que foi inativado, pois este corresponde ao corpúsculo de Barr ou cromatina sexual.

Está(ão) correta(s)

a) apenas I.
b) apenas II.
c) apenas III.
d) apenas I e II.
e) apenas I e III.

41. (UFRS) Um homem é heterozigoto para um gene autossômico, Aa, e possui um alelo ligado ao X recessivo b. Que proporção dos seus espermatozóides espera-se que seja A/X^b?

a) 0 %
b) 25 %
c) 50 %
d) 75 %
e) 100 %

42. (MACK) Um indivíduo daltônico e não míope, filho de pai míope, casa-se com uma mulher normal para ambas as características. O casal já tem uma filha daltônica e míope. Sabendo que o daltonismo é condicionado por um gene recessivo ligado ao sexo e que a miopia é uma herança autossômica recessiva, a probabilidade de terem uma menina normal para ambas as características é de

a) 3/16.
b) 1/4.
c) 1/16.
d) 1/2.
e) 9/16.

43. (UFLAVRAS) Em bovinos ocorrem 60 cromossomos na célula somática, sendo 58 autossomos mais dois cromossomos sexuais, XX na fêmea, e 58 autossomos mais XY no macho. O gene responsável pela quantidade de pêlos no animal está situado no cromossomo X. Esse gene é representado por dois alelos, o R, responsável por animal peludo, e o r, recessivo, responsável por animal sem pêlo.

A partir do cruzamento

$$X^rY \times X^RX^r,$$

as proporções fenotípicas esperadas na descendência são

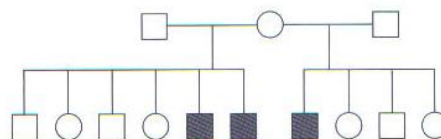
a) Macho peludo: 1/4;
Macho sem pêlo: 1/4;
Fêmea peluda: 1/4;
Fêmea sem pêlo: 1/4.

b) Macho peludo: 9/16;
Macho sem pêlo: 3/16;
Fêmea peluda: 3/16;
Fêmea sem pêlo: 1/16.

c) Macho peludo: 3/8;
Macho sem pêlo: 1/8;
Fêmea peluda: 3/8;
Fêmea sem pêlo: 1/8.

d) Macho peludo: 36/64;
Macho sem pêlo: 9/64;
Fêmea peluda: 9/64;
Fêmea sem pêlo: 10/64.

e) Macho peludo: 1/8;
Macho sem pêlo: 3/8;
Fêmea peluda: 3/8;
Fêmea sem pêlo: 1/8.

44. (UFRS) Interprete o heredograma abaixo.

Identifique o mais provável padrão de herança representado no heredograma:

a) autossômica dominante;
b) ligada ao X dominante;
c) ligada ao Y dominante;
d) ligada ao Y recessiva;
e) ligada ao X recessiva.

45. (UEL) Em seres humanos, uma forma de daltonismo que provoca cegueira para as cores vermelha e verde é determinada pelo gene recessivo d, ligado ao cromossomo X. Ao consultar um médico, um casal fica sabendo que todos os seus filhos do sexo masculino serão daltônicos; já as meninas serão normais. Qual das opções fenotípicas abaixo corresponde à do casal em questão?

a) Homem normal e mulher normal.
b) Homem normal e mulher daltônica.
c) Homem daltônico e mulher daltônica.
d) Homem daltônico e mulher normal.
e) Homem normal e mulher normal, porém portadora de gene recessivo d.

46. (UFSCAR) Em drosófila, o caráter cerdas retorcidas é determinado por um gene recessivo e ligado ao sexo. O alelo dominante determina cerdas normais (não retorcidas).

Uma fêmea heterozigota foi cruzada com um macho normal. A descendência esperada será de

a) 50% de machos e 50% de fêmeas normais e 50% de machos e 50% de fêmeas com cerdas retorcidas.
b) 50% de machos normais, 50% de machos com cerdas retorcidas e 100% de fêmeas normais.
c) 100% de machos normais, 50% de fêmeas com cerdas retorcidas e 50% de fêmeas normais.
d) 100% de machos com cerdas retorcidas e 100% de fêmeas normais.
e) 100% de machos normais e 100% de fêmeas com cerdas retorcidas.

47. (MACK) A respeito das heranças recessivas ligadas ao sexo (genes situados no cromossomo X), considere as seguintes afirmações:

I. Os homens só apresentam dois genótipos possíveis, enquanto as mulheres apresentam três genótipos possíveis;
II. As mulheres heterozigotas têm fenótipo normal;
III. As filhas de pai normal serão sempre normais;
IV. Se a mãe for afetada, todos os seus filhos do sexo masculino também serão afetados.

São corretas

a) I, III e IV apenas.
b) I e III apenas.
c) I, II, III e IV.
d) II e IV apenas.
e) III e IV apenas.

48. (UFSCAR) A hemofilia é uma doença recessiva ligada ao sexo, que se caracteriza pela dificuldade de coagulação do sangue. Em um casal em que a mulher é heterozigota para a hemofilia e o marido é normal, a probabilidade de nascimento de uma criança do sexo masculino e hemofílica é:

a) 1/2.
b) 1/3.
c) 1/4.
d) 1/8.
e) 3/4.

49. (FUVEST) O daltonismo é causado por um alelo recessivo de um gene localizado no cromossomo X. Em uma amostra representativa da população, entre 1000 homens analisados, 90 são daltônicos. Qual é a porcentagem esperada de mulheres daltônicas nessa população?

a) 0,81%
b) 4,5%
c) 9%
d) 16%
e) 83%

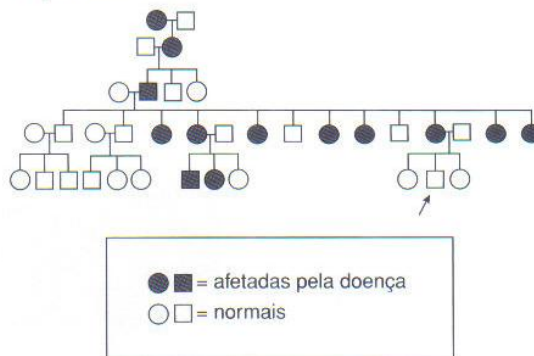
QUESTÕES DISCURSIVAS

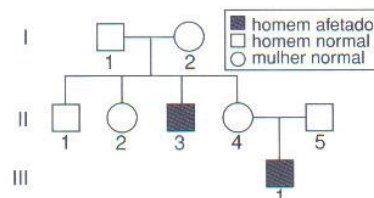
50. (UFRJ) Certos tipos de câncer, em especial aqueles ligados às células do sangue, são tratados com transplantes de medula óssea. Nesses transplantes, uma parte da medula óssea de um doador sadio é introduzida na coluna vertebral de um paciente cujas células da medula óssea foram previamente eliminadas com auxílio de drogas ou de radiação. Após o transplante de medula é possível identificar os cromossomos de células de diversos órgãos e tecidos.

A tabela a seguir mostra os resultados da classificação dos cromossomos de 4 tecidos de um paciente submetido a transplante de medula.

Tipo Celular	Cariótipo
Epitélio Intestinal	46, XY
Linfócitos B	46, XX
Músculo liso	46, XY
Macrófagos	46, XX

Com base nesses resultados, identifique o sexo do paciente e o sexo do doador. Justifique sua resposta.

51. (UERJ) Um homem pertence a uma família na qual, há gerações, diversos membros são afetados por raquitismo resistente ao tratamento com vitamina D. Preocupado com a possibilidade de transmitir essa doença, consultou um geneticista que, após constatar que a família reside em um grande centro urbano, bem como a inexistência de casamentos consangüíneos, preparou o heredograma abaixo. Nele, o consultante está indicado por uma seta.

a) Sabendo que a doença em questão é um caso de herança ligada ao sexo, formule a conclusão do geneticista quanto à possibilidade de o consultante transmitir a doença a seus descendentes diretos.
b) Calcule os valores correspondentes à probabilidade de que o primo doente do consultante, ao casar com uma mulher normal, gere filhas e filhos afetados pela doença.

52. (FUVEST) No heredograma a seguir, ocorrem dois meninos hemofílicos. A hemofilia tem herança recessiva ligada ao cromossomo X.

a) Qual é a probabilidade de que uma segunda criança de II-4 e II-5 seja afetada?
b) Qual é a probabilidade de II-2 ser portadora do alelo que causa a hemofilia?
c) Se o avô materno de II-4 era afetado, qual era o fenótipo da avó materna? Justifique sua resposta.

53. (UFRJ) A cor do pêlo dos gatos depende de um par de genes alelos situados no cromossomo X. Um deles é responsável pela cor preta e o outro pela cor amarela. Existe um terceiro gene autossômico (não localizado nos cromossomos sexuais) que é responsável pela cor branca.

Com essas informações, explique por que o pêlo de uma gata pode ter três cores, enquanto o pêlo de um gato só pode ter duas cores.

CAPÍTULO

7 DO GENÓTIPO AO FENÓTIPO: COMO SE EXPRESSAM OS GENES

► O tigre despigmentado à esquerda é portador de uma mutação em um gene que afeta uma enzima relacionada com a cor da pelagem.

7.1 A natureza química dos genes

Um passo importante para a compreensão do funcionamento dos genes foi a identificação de sua natureza química, o que ocorreu no final dos anos 1940, quando se descobriu que os genes são formados por DNA.

A sigla **DNA**, que designa o ácido desoxirribonucléico, tornou-se amplamente conhecida nas duas últimas décadas, principalmente devido à popularização dos exames para identificação de paternidade duvidosa. No meio científico, porém, essa sigla já era bem conhecida desde o início da década de 1950, quando ficou comprovado que o ácido desoxirribonucléico é o material que constitui os genes.

Nas últimas cinco décadas, os progressos no estudo do DNA foram enormes: determinou-se sua estrutura molecular; o código genético foi desvendado; descobriu-se como as informações codificadas no DNA são traduzidas em mensagens que controlam o funcionamento celular. Além disso, foram desenvolvidas sofisticadas técnicas de análise e de manipulação de moléculas de DNA que levaram à criação de novos campos de pesquisa e de novas tecnologias. O estopim de toda essa revolução nos conhecimentos genéticos foi a publicação na revista científica inglesa *Nature*, em 25 de abril de 1953, do artigo intitulado *Molecular structure of nucleic acid: a structure for deoxyribose nucleic acid* de autoria dos então jovens pesquisadores James Watson (n.1928) e Francis Crick (1916-2004). **(Fig. 7.1)**

▲ **Figura 7.1** • Os 50 anos da publicação do modelo de Watson e Crick para o DNA foram comemorados com destaque tanto pelas revistas científicas quanto pela imprensa leiga.

QUADRO 7.1 • Breve história da caracterização molecular do DNA

A descoberta do DNA

A história do DNA começa no final da década de 1860, com a chegada do médico suíço Friedrich Miescher (1844-1895) à Universidade de Tübingen, uma pacata cidade no sul da Alemanha. O jovem pesquisador estava disposto a dedicar-se ao estudo da química da célula e escolheu essa universidade porque nela o químico Felix Hoppe-Seyler (1825-1895) havia inaugurado um importante laboratório de química fisiológica. Na época floresciam idéias a respeito das origens e das funções das células. Há pouco tempo, a teoria da geração espontânea havia sido definitivamente desacreditada. A teoria celular estabelecia-se como um dos pilares da Biologia. Por tudo isso, as células atraíam a atenção de estudantes entusiasmados, como Miescher. **(Fig. 7.2)**

▲ **Figura 7.2** • Retrato de Friedrich Miescher, o descobridor do DNA, substância que ele chamou de nucleína.

Felix Hoppe-Seyler foi quem primeiro descreveu as interações entre a hemoglobina, a proteína responsável pela cor vermelha do sangue, e o gás oxigênio. Seu trabalho levou-o a interessar-se pelo pus, cujas células constituintes assemelham-se aos glóbulos brancos presentes na circulação sangüínea. Foi por sugestão de Hoppe-Seyler que Miescher começou a estudar a química das células do pus; o material para a pesquisa era abundante, pois dezenas de bandagens com material purulento eram diariamente descartadas por um hospital próximo à universidade. Miescher trabalhou para desenvolver técnicas adequadas à retirada das células de pus das bandagens e à sua preparação para a análise química. O objetivo inicial era investigar as proteínas celulares, um grupo de substâncias descoberto cerca de 30 anos antes.

Em um de seus muitos experimentos com células do pus, Miescher obteve um precipitado que diferia quimicamente de todas as substâncias protéicas conhecidas. Ele descobriu que a nova substância se concentrava no núcleo celular, na época considerado uma estrutura de pouca importância para o funcionamento da célula. Aprimorando os métodos de extração e purificação da nova substância, Miescher demonstrou que, além de estar nas células do pus, ela também estava presente em materiais tão diversos quanto o rim, o fígado, o testículo, a levedura e as hemácias nucleadas das aves.

A análise química mostrou que as quantidades relativas dos elementos hidrogênio (H), carbono (C), oxigênio (O) e nitrogênio (N) presentes na nova substância diferiam das encontradas em proteínas; além disso, a substância descoberta continha o elemento fósforo (P), ausente em moléculas protéicas. Convencido de que havia realmente descoberto uma nova substância, Miescher denominou-a **nucleína**, pelo fato de ela estar concentrada no núcleo das células.

O trabalho sobre a nucleína só foi publicado em 1871, após certa resistência do editor da revista científica, o próprio Hoppe-Seyler, que, no início, não acreditou nos resultados apresentados por Miescher. Mesmo depois da publicação do trabalho, muitos pesquisadores continuaram duvidando da existência da nucleína; na opinião deles, o achado de Miescher devia ser uma mistura de fosfatos inorgânicos e proteínas.

A elucidação da composição química do DNA

As desconfianças quanto à real existência da nova substância descrita por Miescher só foram superadas por volta de 1889, quando Richard Altmann (1852-1900) obteve preparações altamente purificadas de nucleína, sem nenhuma contaminação por proteínas. Pelo fato de a substância ter caráter ácido, o que já havia sido detectado por Miescher, Altmann sugeriu que ela fosse chamada de **ácido nucléico** em vez de nucleína.

Outro pesquisador pioneiro na descoberta dos ácidos nucléicos foi Albrecht Kossel (1853-1927). Em 1877, ele juntou-se ao grupo de pesquisa de Hoppe-Seyler, então trabalhando na Universidade de Estrasburgo (França), e começou a estudar a composição química das nucleínas de diferentes tipos de células. Entre os produtos da degradação química da nucleína, Kossel detectou dois tipos de bases nitroge- →

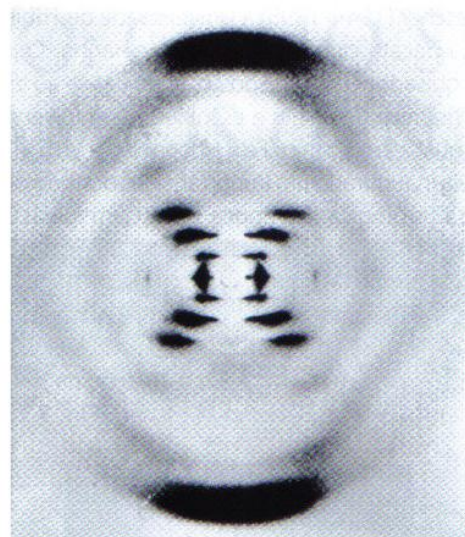
nadas já conhecidas, a adenina e a guanina. Em 1893, ele identificou uma nova base nitrogenada, que era liberada pela degradação de nucleína de células do timo; por isso, denominou-a timina. Logo em seguida, descobriu que a nucleína continha um quarto tipo de base nitrogenada, a qual denominou citosina. Em 1894, o grupo liderado por Kossel descobriu que os ácidos nucléicos continham também pentose, um açúcar com cinco átomos de carbono.

Em 1909, Phoebis Levine (1869-1940) e Walter Jacobs (1883-1967) conseguiram determinar a ordem em que as moléculas de fosfato, de pentose e de base nitrogenada estavam unidas no ácido nucléico, formando sua unidade fundamental, o **nucleotídio**. Em 1930, Levine e colaboradores identificaram a pentose componente do ácido nucléico das células do timo, que denominaram 2-deoxi-D-ribose, pelo fato de ela possuir, no carbono 2 de sua cadeia, um átomo de oxigênio a menos que a ribose, uma pentose já conhecida, encontrada pelos pesquisadores em ácidos nucléicos extraídos de levedura. Ficaram então caracterizados dois tipos de ácidos nucléicos: o **ácido ribonucléico**, ou RNA (do inglês ***r****ibose* ***n****ucleic* ***a****cid*), cujo açúcar é a ribose, e o **ácido desoxirribonucléico**, ou DNA (do inglês ***d****eoxyribose* ***n****ucleic* ***a****cid*), cujo açúcar é a desoxirribose. No nucleotídio, o fosfato está unido ao carbono 5' da pentose, enquanto a base nitrogenada está unida ao carbono 1'. Concluiu-se também que os nucleotídios unem-se uns aos outros por ligações entre o fosfato do carbono 5' da pentose de um nucleotídio e o carbono 3' da pentose do outro, formando uma cadeia polinucleotídica com uma extremidade 5' e outra 3'.

No final da década de 1940, alguns indícios sugeriam que o DNA deveria ser a substância constituinte dos genes. Isso fez com que muitos cientistas voltassem sua atenção ao estudo das moléculas dessa substância, na tentativa de identificar os detalhes da estrutura química do material genético e desvendar os segredos da hereditariedade.

Elucidação da estrutura da molécula do DNA

A estrutura helicoidal do DNA

Apesar de as moléculas de DNA serem grandes quando comparadas a moléculas inorgânicas, elas são pequenas demais para que seus detalhes sejam visualizados, mesmo ao microscópio eletrônico. Entretanto, no final da década de 1940, os biofísicos já dispunham de um método eficiente para estudos da estrutura molecular, a difração de raios X. Os resultados obtidos com essa técnica, pela pesquisadora Rosalind Franklin (1920-1958) no laboratório de H. F. Wilkins (1916-2004), permitiu concluir que a molécula de DNA tem estrutura helicoidal (semelhante a uma mola espiral) com 2 nm (0,000002 mm) de espessura. **(Fig. 7.3)**

▲ **Figura 7.3** • Padrão de difração de raios X de uma amostra cristalina de DNA. Esse padrão é obtido por meio do bombardeamento com raios X da amostra de DNA que se quer analisar. Ao atravessar a amostra os raios são desviados de acordo com a estrutura molecular da substância; os raios X difratados atingem uma chapa fotográfica, formando um padrão de imagem que é registrado e analisado por um especialista.

A relação A/T = C/G = 1

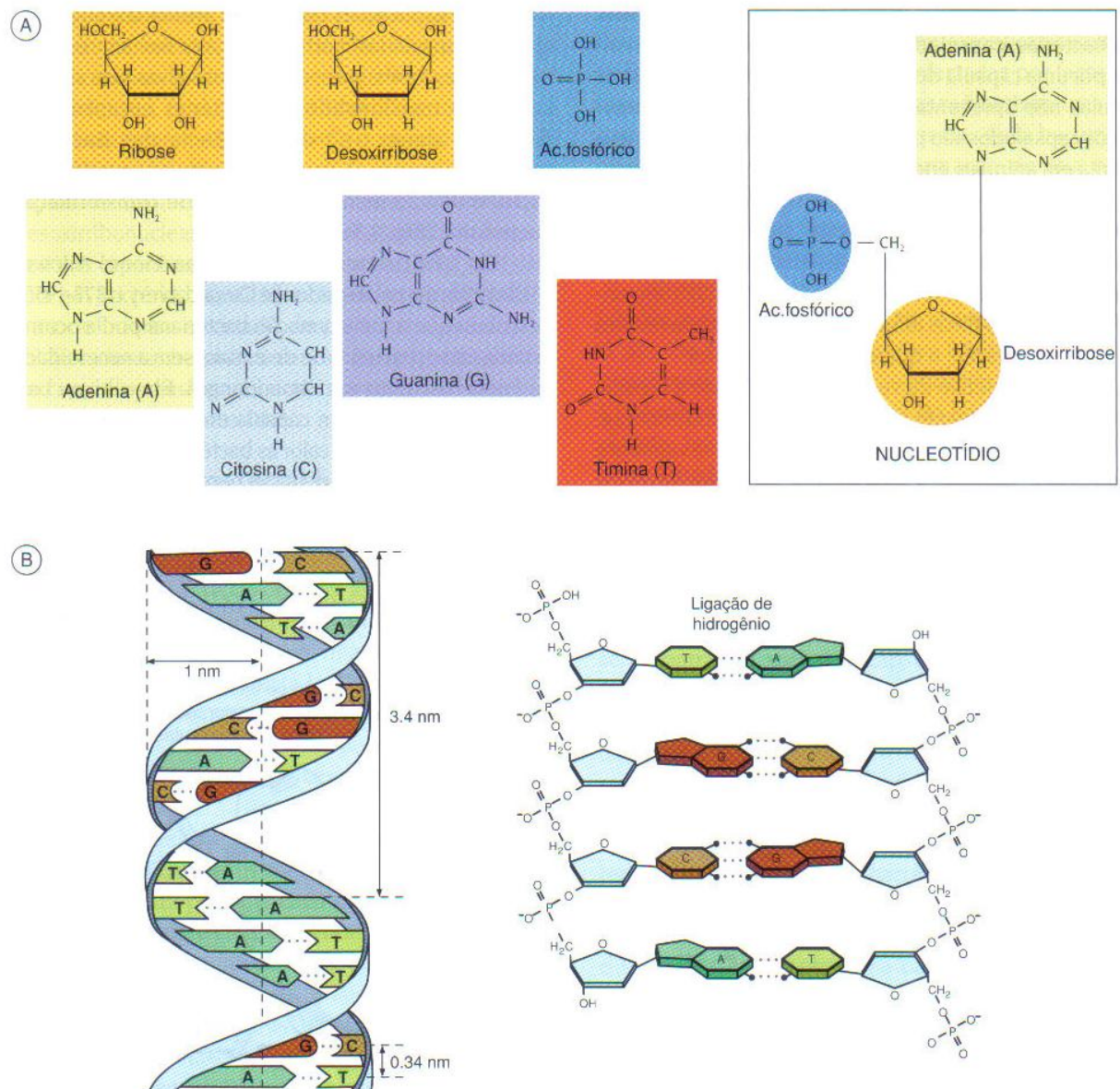
Outra importante descoberta em relação à composição do DNA foi feita pelo pesquisador austríaco Erwin Chargaff (1905-2002). Ele verificou que, em qualquer DNA estudado, a quantidade da base adenina era sempre igual à quantidade de timina e que a quantidade de citosina era sempre igual à de guanina (A/T = C/G = 1). Qual seria o significado dessas equivalências entre as bases, nas moléculas de DNA?

O modelo de Watson e Crick

As informações disponíveis sobre o DNA, no começo de 1950, eram como peças desencontradas de um quebra-cabeça. Reunindo-as de modo coerente, o biólogo James D. Watson e o físico Francis H. C. Crick elaboraram o modelo da dupla-hélice para a molécula de DNA.

Segundo esse modelo, hoje amplamente aceito, a molécula de DNA é composta por duas longas cadeias paralelas, constituídas por nucleotídios dispostos em seqüência. Essas duas cadeias polinucleotídicas são rigorosamente complementares: se houver uma adenina em →

uma das cadeias, haverá, na outra cadeia, na mesma posição, uma timina. Da mesma forma, se houver uma citosina em uma das cadeias, haverá uma guanina na posição correspondente da cadeia complementar. Os nucleotídios de uma das cadeias da molécula de DNA mantêm-se unidos aos nucleotídios da outra cadeia por **ligações de hidrogênio** estabelecidas entre as bases: a adenina liga-se especificamente à timina, e a citosina liga-se especificamente à guanina. **(Fig. 7.4)**

O modelo da dupla-hélice de Watson e Crick foi prontamente aceito pela comunidade científica; ele explicava pelo menos três características fundamentais do material genético: a capacidade de duplicação, a capacidade de conter informações para a produção de proteínas e a capacidade de sofrer mutação. Em 1962, Watson, Crick e Wilkins, este último um dos responsáveis pelas análises da difração de raios X do DNA, ganharam o Prêmio Nobel em Medicina ou Fisiologia por seus trabalhos sobre a estrutura da molécula. Rosalind Franklin foi excluída do prêmio porque já havia falecido na época e o prêmio Nobel só é concedido a pessoas vivas.

▲ **Figura 7.4** • **A.** Componentes das moléculas de DNA. Observe a diferença entre as estruturas da desoxirribose, o açúcar do DNA, e da ribose, o açúcar do RNA. **B.** A molécula de DNA é constituída por duas cadeias de nucleotídios que se mantêm unidas por meio de pontes de hidrogênio que se estabelecem entre A e T e entre C e G.

Identificação do DNA como material hereditário

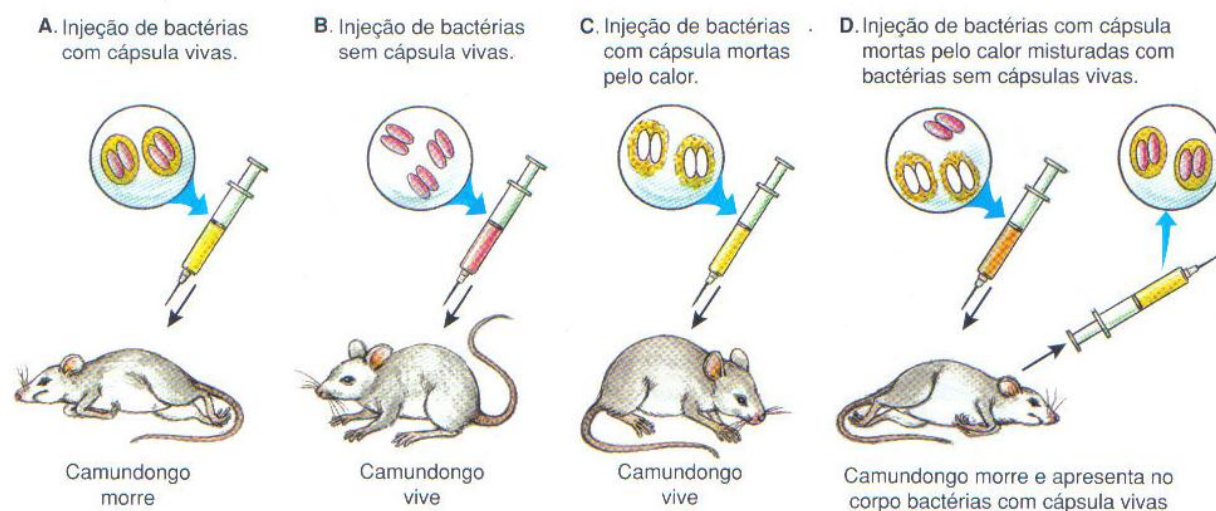
O DNA como agente da transformação bacteriana

A história da identificação do DNA como material hereditário começou em 1928, com a descoberta do fenômeno da **transformação bacteriana** pelo médico inglês Fred Griffith (1877-1941). Na época, Griffith estudava a bactéria *Diplococcus pneumoniae* (atualmente classificada como *Streptococcus pneumoniae*), causadora de pneumonia em seres humanos e outros mamíferos. Sabia-se da existência de duas linhagens dessa espécie de bactérias: **capsuladas**, em que as células são envoltas por uma cápsula de muco, e **sem cápsula**, em que as células não apresentam envoltório mucoso. Pneumococos capsulados são patogênicos, isto é, causam pneumonia em animais, enquanto penumococos sem cápsula não causam a doença. A presença de cápsula é hereditária: bactérias capsuladas, quando se reproduzem, sempre originam bactérias-filhas capsuladas, enquanto bactérias sem cápsula, ao se reproduzirem, originam bactérias-filhas idênticas a si, sem cápsula (exceto se ocorrer mutação, o que é evento raríssimo).

Com o objetivo de verificar se era ou não a cápsula o fator desencadeante da pneumonia, Griffith injetou, em camundongos, bactérias capsuladas previamente mortas pelo calor. Os animais continuaram saudáveis, o que o levou a concluir que as bactérias capsuladas tinham de estar vivas para causar a doença.

Em outros camundongos, Griffith injetou uma mistura de bactérias capsuladas mortas pelo calor e bactérias sem cápsula vivas. Ele esperava que os camundongos se mantivessem saudáveis, pois, conforme já sabia, bactérias capsuladas mortas não causavam a doença, assim como as bactérias sem cápsula. O resultado foi surpreendente: os quatro animais que haviam recebido injeção da mistura — bactérias capsuladas mortas e bactérias sem cápsula vivas — morreram de pneumonia; em seu sangue havia bactérias capsuladas vivas. Cerca de 30 animais que serviram de grupo de controle experimental, nos quais apenas bactérias sem cápsula vivas foram injetadas, continuaram perfeitamente saudáveis. Esse resultado, não previsto por Griffith, levou-o a repetir o experimento, com resultados idênticos.

Duas explicações podiam ser aventadas: ou as bactérias encapsuladas mortas pelo calor haviam ressuscitado, o que era absurdo, ou bactérias vivas sem cápsula haviam se transformado em bactérias encapsuladas, devido a algum tipo de influência das bactérias capsuladas mortas. O cientista admitiu a segunda explicação, e deu ao fenômeno o nome de **transformação bacteriana**. **(Fig. 7.5)**

Em 1933, o pesquisador James Lionel Alloway (1900-1954), um colaborador de Oswald Avery (1877-1955), descobriu que a transformação bacteriana podia ocorrer *in vitro*, isto é, em um tubo de ensaio, sem a necessidade de injetar bactérias em camundongos. Ele cultivou bactérias capsuladas e sem cápsula em frascos separados. Em seguida, matou por calor as bactérias capsuladas e as macerou, para que não restasse nenhuma célula íntegra. O extrato de bactérias capsuladas foi, então, misturado a bactérias vivas sem cápsula. Depois de algum tempo, foram detectadas bactérias capsuladas vivas, resultantes da transformação de bactérias sem cápsula.

▲ **Figura 7.5** • Representação do experimento de Griffith que revelou a existência da transformação hereditária de bactérias sem cápsula em bactérias capsuladas. Esse estudo permitiu, posteriormente, a identificação do DNA como material hereditário.

Alloway observou que extrato de bactérias capsuladas, quando tratado de maneira apropriada com álcool, formava um precipitado espesso e viscoso, que continuava a apresentar capacidade transformante, isto é, de produzir transformação das bactérias. Se o precipitado obtido do extrato bruto fosse colocado em culturas de bactérias sem cápsula, algumas delas transformavam-se em bactérias capsuladas e passavam a transmitir essa característica às suas descendentes. Essa descoberta criou a possibilidade de purificar o agente químico causador da transformação.

Avery e dois de seus colaboradores, Colin M. MacLeod (1909-1972) e Maclyn McCarty (n. 1911), isolaram um extrato com alto poder transformante e o trataram com diferentes enzimas: amilases, que degradam polissacarídios, proteases, que degradam proteínas, e ribonucleases, que degradam RNA. Constataram que esses tratamentos não afetavam o poder do extrato de transformar bactérias sem cápsula em bactérias capsuladas. Somente quando o extrato foi tratado com desoxirribonuclease, enzima que degrada DNA, ele perdeu sua capacidade de transformar bactérias sem cápsula em bactérias capsuladas. Assim, em 1944, após 12 anos de intensa atividade de pesquisa, Avery e seus colaboradores chegaram à conclusão de que a substância capaz de transformar bactérias sem cápsula em bactérias capsuladas era o DNA.

O DNA como material hereditário dos bacteriófagos

Avery e seus colaboradores foram cautelosos ao interpretar os resultados obtidos; assim, não afirmaram que o DNA era o material hereditário das bactérias. Diversos pesquisadores, porém, imaginaram essa possibilidade, e passaram a testá-la. Um dos experimentos pioneiros na demonstração de que o DNA é o material hereditário foi realizado pelos pesquisadores norte-americanos Alfred Day Hershey (1908-1997) e Martha Chase (1928-2003).

Esses pesquisadores trabalharam com o bacteriófago T2, um vírus constituído por uma molécula de DNA envolta por uma capa protéica, cujo ciclo de vida era bem conhecido na época. Um único bacteriófago, ou fago, pode infectar uma bactéria e causar sua destruição (lise) em cerca de 30 minutos, com liberação de centenas de novos vírus, idênticos ao que causou a infecção. A pergunta que se fazia era: qual dos dois componentes do fago, o DNA ou a proteína da cápsula, ou ambos, constituiria o material hereditário?

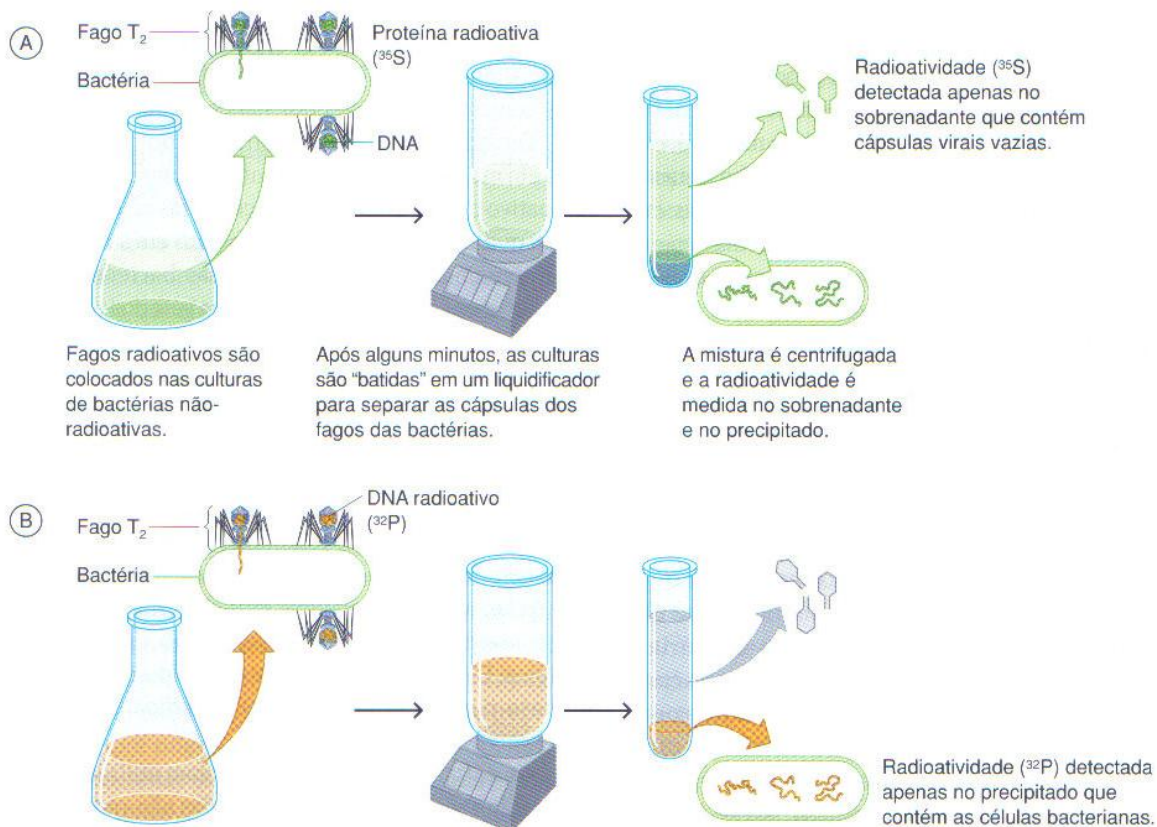
Engenhosamente, Hershey e Chase basearam-se no fato que proteínas não contêm fósforo em sua composição e que o DNA, por sua vez, não contém enxofre. Isso lhes permitiu elaborar um experimento que, apesar de simples, possibilitou a identificação do DNA do vírus como o responsável por sua hereditariedade.

Quando bactérias são cultivadas por várias gerações em meio de cultura que contém átomos do isótopo radioativo do **fósforo (^{32}P)**, moléculas das células bacterianas que têm átomos desse elemento em sua composição tornam-se radioativas. Se essas bactérias forem infectadas por bacteriófagos, os fagos gerados terão seu **DNA radioativo**, uma vez que o vírus utiliza matéria-prima da bactéria hospedeira para produzir sua descendência. Da mesma forma, se bactérias forem cultivadas em meio de cultura que contém o isótopo radioativo do **enxofre (^{35}S)**, elas produzirão aminoácidos com átomos desse isótopo radioativo e suas proteínas ficarão radioativas. Se essas bactérias forem infectadas por fagos, os fagos gerados terão suas **proteínas radioativas**, uma vez que os fagos utilizam aminoácidos da célula bacteriana como matéria-prima para a formação de sua capa protéica. Esse foi o procedimento seguido por Hershey e Chase para obter fagos com DNA radioativo e fagos com proteínas radioativas.

Os dois tipos de bacteriófago foram utilizados para infectar, independentemente, bactérias não-radioativas. O destino dos dois componentes básicos do vírus — proteínas e ácidos nucléicos — pôde ser seguido graças à radioatividade do enxofre ou do fósforo neles incorporada. Imediatamente após a infecção, as bactérias eram agitadas em um liquidificador para desfazer as ligações das capas protéicas virais aderidas às paredes bacterianas. Em seguida, as culturas eram centrifugadas para separar as bactérias das capas protéicas virais. A radioatividade era medida tanto nas bactérias precipitadas quanto no sobrenadante da centrifugação, onde se encontravam apenas as cápsulas virais. **(Fig. 7.6**, na página seguinte)

Verificou-se que o fósforo radioativo incorporado nos fagos era transferido para as bactérias infectadas; a radioatividade aparecia posteriormente na progênie de fagos produzidos quando a bactéria era destruída. A radioatividade devida ao enxofre tinha um destino diferente: ela não penetrava na bactéria infectada, nem aparecia na progênie viral.

Esses resultados permitiram concluir que apenas o DNA do fago penetrava na bactéria, por ocasião da infecção, e que a partir dele é produzida toda uma geração de fagos com DNA e proteínas típicos da espécie de fago infectante. Portanto, a fonte das informações hereditárias é o DNA, que orienta a formação tanto de DNA quanto de proteínas virais.

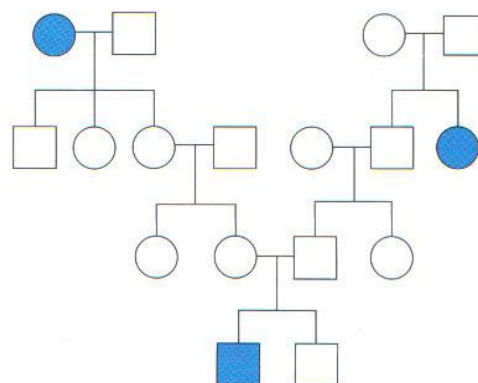
A identificação do DNA como material hereditário levou a uma nova pergunta: que características permitem ao DNA conter a informação hereditária?

▲ **Figura 7.6** • Representação do experimento do liquidificador, de Hershey e Chase, considerado na época o melhor indício de que o DNA era o material hereditário dos seres vivos. **A.** Teste das linhagens virais com proteínas radioativas. **B.** Teste das linhagens virais com DNA radioativo.

7.2 A descoberta do modo de ação dos genes

Primeiras hipóteses sobre como atuam os genes

O primeiro pesquisador a sugerir que os genes atuavam por meio de enzimas foi o médico inglês Archibald E. Garrod (1857-1939). Ele propôs uma hipótese para explicar a enfermidade conhecida como alcaptonúria, no começo do século XX, quando ainda se sabia pouco sobre genes e enzimas. A alcaptonúria é uma doença rara em que a pessoa excreta na urina uma substância chamada alcaptona, que escurece em contato com o ar.

Garrod havia examinado a genealogia de uma criança portadora de alcaptonúria, e o fato de os pais da criança serem primos em primeiro grau levou-o a pensar que a enfermidade podia ser hereditária. Em 1902, após estudar, juntamente com Bateson, a genealogia de outros alcaptonúricos, Garrod concluiu que a doença devia ser condicionada por um alelo recessivo. **(Fig. 7.7)**

O pesquisador supôs que a alcaptona se formava em todas as pessoas. Os indivíduos normais transformam essa substância em outras, enquanto os alcaptonúricos não conseguem fazer essa transformação devido à falta de uma enzima. Por isso, excretam alcaptona na urina. Nos anos seguintes, Garrod estudou diversas doenças hereditárias semelhantes à alcaptonúria, em que a pessoa nasce com uma alteração no metabolismo, chamando-as de **erros inatos do metabolismo**.

▲ **Figura 7.7** • Heredograma de uma família em que existem indivíduos afetados pela alcaptonúria, indicados em azul. Por meio da análise de genealogias como essa, Garrod e Bateson concluíram que a alcaptonúria é hereditária.

QUADRO 7.2 • Erros inatos do metabolismo

Com a demonstração, a partir de meados da década de 1940, de que os genes atuam por meio do controle do metabolismo das células, a hipótese original de Garrod para explicar os erros inatos do metabolismo foi confirmada. A fenilcetonúria, a alcaptonúria e o albinismo são três doenças hereditárias causadas por alterações em genes que atuam no metabolismo da fenilalanina, um aminoácido. As reações químicas, ou passos metabólicos, catalisados pelas enzimas codificadas por esses genes estão mostrados na figura 7.8, que representa parte da via bioquímica do metabolismo da fenilalanina.

Fenilalanina

Passo 1 (Fenilcetonúria)

Tirosina

Via A (Albinismo)

Melanina

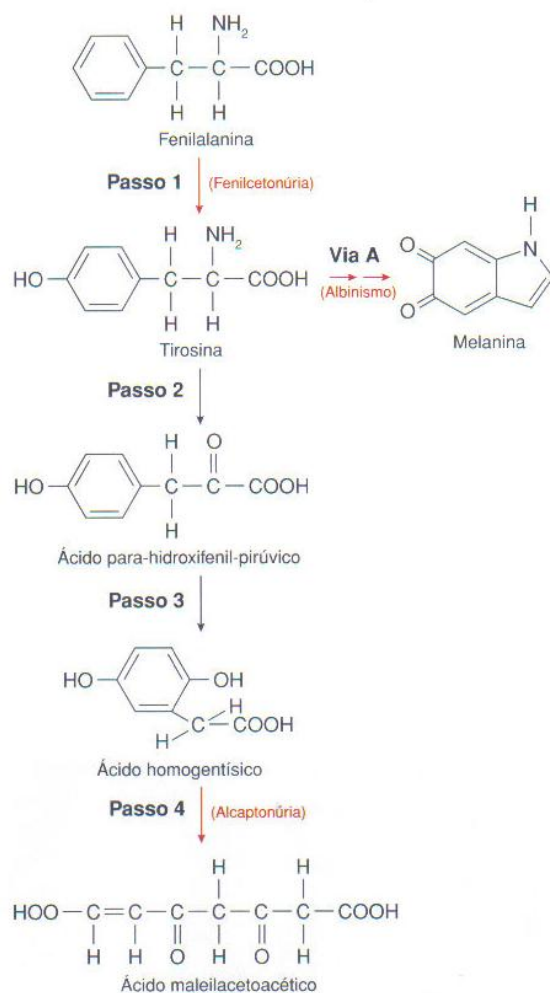
Passo 2

Ácido para-hidroxifenil-pirúvico

Passo 3

Ácido homogentísico

Passo 4 (Alcaptonúria)

Ácido maleilacetoacético

▲ **Figura 7.8** • Etapas do metabolismo do aminoácido fenilalanina. O esquema mostra os passos em que atuam as enzimas cujas disfunções levam à fenilcetonúria (passo 1), à alcaptonúria (passo 4) e ao albinismo (via A). Na via A, que leva à produção do pigmento melanina, foram omitidos os passos intermediários.

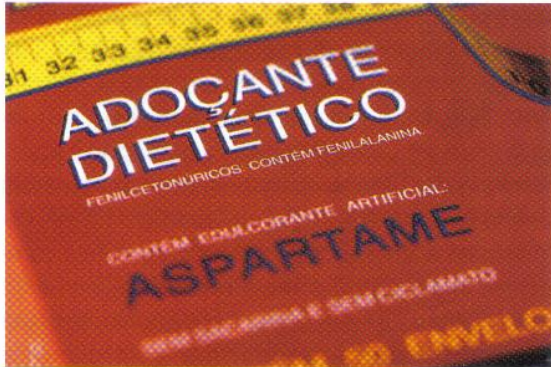
A **fenilalanina** é um aminoácido essencial à nossa espécie. Como não conseguimos sintetizá-lo, temos de recebê-lo pronto na dieta (relembre o item sobre aminoácidos essenciais no capítulo 3 do volume 1 desta coleção). Nossas células utilizam fenilalanina obtida do alimento para sintetizar suas proteínas, e o excedente desse aminoácido é transformado em tirosina. A tirosina, por sua vez, é um aminoácido não-essencial, utilizado em nossas células para a síntese de proteínas e de outros compostos importantes, como a **melanina** (pigmento presente na pele e nos pêlos), os hormônios **tirosina** e **triiodotironina** (produzidos pela glândula tireoidea) e os hormônios **adrenalina** e **noradrenalina** (produzidos pela glândula supra-renal). **(Fig. 7.8)**

Fenilcetonúria

A **fenilcetonúria** é uma doença hereditária causada por um alelo recessivo de um gene localizado no cromossomo 12 humano, cuja freqüência varia nas diversas populações. Entre os caucasianos, uma em cada 10.000 crianças nasce com a enfermidade; entre os turcos, essa taxa é de 1 em cada 2.600 nascimentos; entre os japoneses, é de 1 em cada 143.000 nascimentos; entre os africanos, a doença é extremamente rara.

Observe, na figura 7.8, que a reação química de transformação da fenilalanina em tirosina consiste na adição de uma hidroxila (OH) ao anel hexagonal da molécula; essa reação é catalisada pela enzima fenilalanina hidroxilase, também chamada de fenilalanina-4-monoxigenase. Se essa enzima faltar, o que ocorre quando a pessoa é homozigótica para o alelo alterado do gene que a produz, as células não transformam fenilalanina em tirosina. Nessas pessoas, denominadas fenilcetonúricas, a fenilalanina não utilizada na síntese das proteínas acumula-se no sangue e é convertida em outras substâncias, como ácido fenil-pirúvico, ácido fenil-lático e fenil-acetil-glutamina. Algumas dessas substâncias são tóxicas e causam lesões cerebrais, por isso, os fenilcetonúricos não tratados adequadamente tornam-se deficientes mentais. Isso pode ser evitado se a deficiência for detectada precocemente, logo após o nascimento. Por essa razão, em muitos países é obrigatório submeter os recém-nascidos a um exame laboratorial (popularmente chamado de *teste do pezinho*) para identificar os afetados. No Brasil esse

→

exame é obrigatório com base na lei federal nº 8.069. Uma vez diagnosticada a doença, a pessoa deve passar a ingerir na dieta apenas o mínimo de fenilalanina requerido pelo organismo. **(Fig. 7.9)**

▲ **Figura 7.9** • O consumo de adoçantes artificiais à base de aspartame deve ser evitado pelos fenilcetonúricos, pois essa substância é composta por fenilalanina e ácido aspártico.

Alcaptonúria

A **alcaptonúria** é causada pelo alelo recessivo de um gene autossômico localizado no cromossomo 3 humano. O alelo é raro na maioria das populações humanas. A freqüência de pessoas afetadas é da ordem de 1 em cada 250 mil a 1 milhão de nascimentos. Na Eslováquia, porém, ocorre 1 caso em cada 19 mil nascimentos. O gene cuja alteração causa a alcaptonúria codifica a enzima chamada de oxidase do ácido homogentísico, responsável pela transformação desse ácido no ácido maleilacetoacético. O ácido homogentísico, ou alcaptona, acumula-se no sangue e é eliminado na urina, que se torna escura em contato com o ar; por isso o distúrbio metabólico pode ser diagnosticado com facilidade. A alcaptonúria é uma enfermidade mais branda que a fenilcetonúria; os principais agravos que causa são o escurecimento das cartilagens e uma certa propensão à artrite.

Albinismo

O termo albinismo refere-se a um conjunto de condições hereditárias que leva as pessoas afetadas a ter pouca ou nenhuma pigmentação nas estruturas de origem epidérmicas. O **albinismo tipo 1** é condicionado por um alelo recessivo de um gene localizado no cromossomo 11 humano, que codifica a enzima tirosinase, a qual atua na transformação de tirosina em melanina. Os homozigóticos recessivos para o alelo mutante desse gene apresentam ausência total do pigmento melanina na pele, nos olhos, pêlos e cabelos.

A teoria "um gene — uma enzima"

Os primeiros indícios experimentais de que os genes atuam por meio do controle da síntese das enzimas foram obtidos em meados da década de 1930. Os pesquisadores George W. Beadle (1903-1989), Boris Ephrussi (1901-1979) e Edward L. Tatum (1909-1975) mostraram que a cor alterada do olho de um mutante da mosca *D. melanogaster* devia-se à incapacidade do inseto de realizar uma reação química específica na via metabólica da síntese de um pigmento visual.

Entusiasmados com os resultados obtidos com o estudo da mosca, mas cientes de que aquele era um organismo muito complexo para o teste de sua hipótese, Beadle e Tatum resolveram utilizar um organismo mais simples em seus experimentos: o bolor rosado do pão, *Neurospora crassa*.

Características favoráveis de *Neurospora* como material experimental

A escolha de *Neurospora* deveu-se à facilidade de seu cultivo em laboratório e a seu ciclo de vida ser bem conhecido, além de já ter sido utilizada em experimentos genéticos. Outra vantagem notada por Beadle e Tatum é que esse fungo pode crescer em meio de cultura simples, chamado pelos pesquisadores de **meio mínimo**. No experimento com *Neurospora*, o meio mínimo era constituído por água, sais inorgânicos, açúcar, biotina (uma vitamina) e ágar, este para dar consistência sólida ao meio. **(Fig. 7.10)**

▲ **Figura 7.10** • George W. Beadle (à esquerda) e Edward L. Tatum.

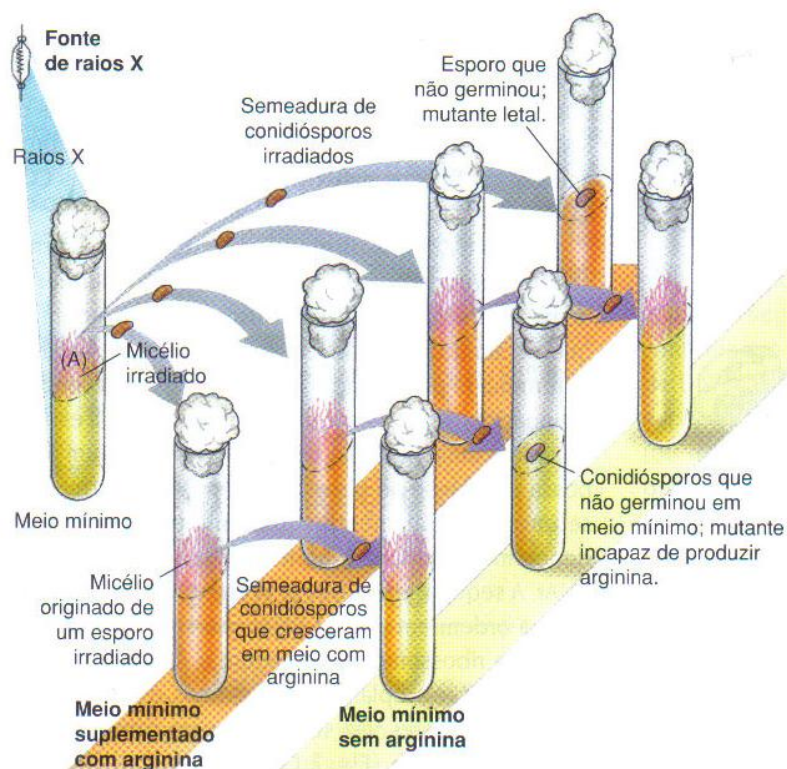
As hifas de *Neurospora* têm núcleos haplóides, de modo que os micélios (conjunto de hifas) têm apenas uma cópia de cada gene. Os micélios podem ser de dois sexos: + e −. Na reprodução sexuada, células especiais de um micélio + unem-se a outras de um micélio −, originando zigotos diplóides. Esses dividem-se imediatamente por meiose, originando 4 células haplóides que, ao se dividirem novamente por mitose, originam 8 esporos, os ascósporos. Cada ascósporo, ao germinar, origina um novo micélio haplóide, mas com nova combinação entre os genes dos micélios parentais. O micélio também se reproduz assexuadamente por meio de esporos denominados conidiósporos. A germinação de um conidiósporo origina um micélio haplóide geneticamente idêntico ao micélio que o formou (relembre o ciclo de vida dos ascomicetos no capítulo 4 do volume 2 desta coleção).

A hipótese de Beadle e Tatum

Beadle e Tatum imaginaram que, para produzir todos os seus componentes, as células do fungo deviam realizar milhares de reações químicas, cada uma delas catalisada por uma enzima específica. Se a hipótese de que cada enzima é codificada por um gene específico estivesse correta, para cada reação metabólica devia haver um gene correspondente, responsável pela produção da enzima catalisadora específica. O que aconteceria se um desses genes essenciais à sobrevivência sofresse mutação, produzindo uma forma inativa da enzima?

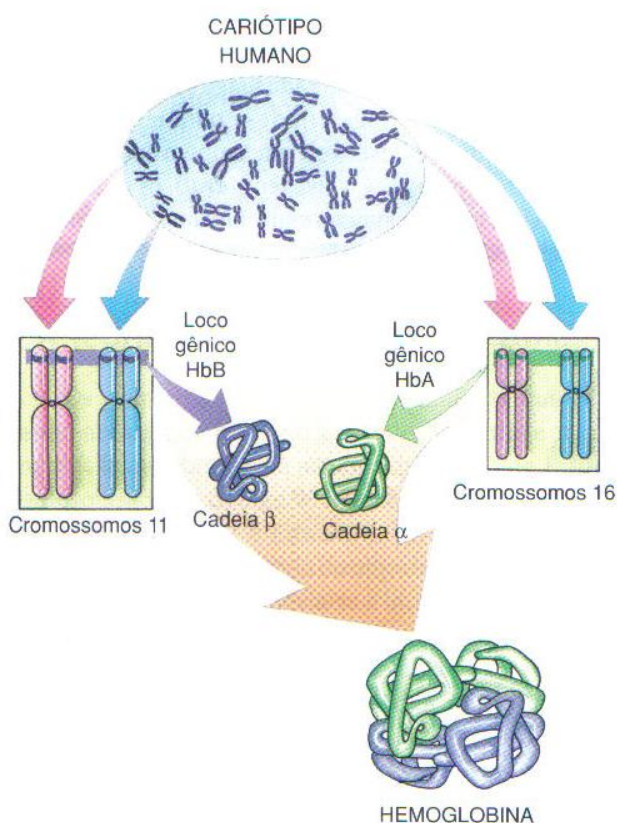
Sendo a *Neurospora* haplóide, um mutante para um gene essencial não sobreviveria, a menos que a substância codificada pelo gene fosse fornecida ao organismo como alimento. Essa idéia levou Beadle e Tatum a realizar um conjunto de experimentos com *Neurospora* pelos quais eles receberam, em 1958, o Prêmio Nobel em Medicina ou Fisiologia.

Em uma primeira etapa, para aumentar a freqüência de mutação dos genes, Beadle e Tatum irradiaram esporos do fungo com raios X. Os esporos irradiados eram colocados em tubos de ensaio que continham diferentes meios de cultura. Para selecionar um mutante incapaz de produzir o aminoácido arginina, por exemplo, bastava suplementar o meio mínimo com arginina: os fungos mutantes absorviam essa substância do meio e sobreviviam à sua deficiência genética. Um problema dessa técnica é que nos meios mínimos suplementados cresciam também fungos selvagens, isto é, que não haviam sofrido mutações. Como diferenciar um fungo selvagem, em que o gene para sintetizar arginina é funcional (***arg***$^+$), de um fungo mutante, portador de um alelo defeituoso do gene (***arg***$^-$)?

Beadle e Tatum encontraram a solução retirando uma pequena amostra de cada fungo cultivado no meio suplementado e transferindo-a para meio mínimo. Os fungos que se desenvolviam também em meio mínimo eram, com certeza, selvagens (***arg***$^+$); os que não sobreviviam no meio mínimo eram mutantes, naquele caso incapazes de produzir arginina (***arg***$^-$). **(Fig. 7.11)**

◀ **Figura 7.11** • Representação simplificada do experimento de Beadle e Tatum com o fungo *Neurospora crassa*. Um micélio (A) foi submetido a raios X e os conidiósporos irradiados foram semeados em meio mínimo suplementado com o aminoácido arginina, onde se desenvolvem tanto fungos selvagens como os fungos portadores de mutações que impedem a síntese de arginina. Esporos assexuados ou partes desses micélios foram em seguida semeados em meio mínimo; os que não crescem são mutantes (*arg*$^-$).

Os genes e o controle da síntese de polipeptídios

Os resultados dos experimentos de Beadle e Tatum consolidaram a **teoria um gene — uma enzima**, que foi logo ampliada para um gene — uma proteína, pois ficou claro que os genes controlavam a síntese de qualquer proteína, e não apenas das proteínas enzimáticas. Quando se descobriu que uma proteína podia ser formada por mais de uma cadeia polipeptídica, cada uma delas condicionada por um gene diferente, a teoria tornou-se ainda mais abrangente e passou a ser denominada **teoria "um gene — um polipeptídio"**.

A hemoglobina humana, por exemplo, é uma proteína formada por quatro cadeias de dois tipos de polipeptídios, **alfa** e **beta**. Os dois locos gênicos responsáveis pela produção desses polipeptídios localizam-se em cromossomos humanos diferentes. **(Fig.7.12)**

▲ **Figura 7.12** • Representação do papel de dois genes localizados em cromossomos humanos diferentes (11 e 16) na produção da hemoglobina. O par de cromossomos 11 contém o gene HbB, responsável pela produção da cadeia beta da hemoglobina, um polipeptídio com 146 aminoácidos. O par de cromossomos 16 contém o gene HbA, responsável pela produção da cadeia alfa da hemoglobina, um polipeptídio com 141 aminoácidos.

7.3 Relação entre gene, RNA e proteína

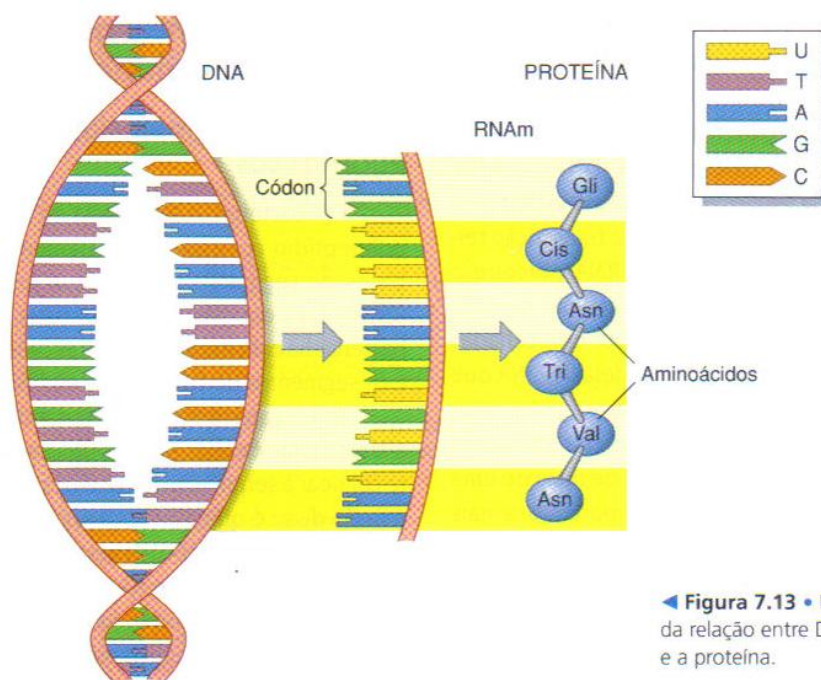
O desenvolvimento da teoria "um gene — um polipeptídio", no final da década de 1940, e a identificação do DNA como material hereditário, no início da década de 1950, impulsionaram os estudos genéticos em nível molecular. As pesquisas mostraram que o DNA, por meio de moléculas mensageiras de RNA, atua indiretamente na síntese das proteínas. As instruções codificadas nas seqüências de bases nitrogenadas do DNA constituinte dos genes são transcritas para moléculas de RNA e, destas, traduzidas em seqüências de aminoácidos das proteínas.

Tipos de RNA

Três tipos básicos de RNA participam diretamente da síntese das proteínas nas células de todos os seres vivos: RNA ribossômico (RNAr), RNA transportador (RNAt) e RNA mensageiro (RNAm).

Os **RNA ribossômicos** constituem, juntamente com certas proteínas, minúsculos grânulos citoplasmáticos denominados **ribossomos**, capazes de unir os aminoácidos entre si e formar as cadeias polipeptídicas que constituem as proteínas.

Os **RNA transportadores** têm por função capturar aminoácidos livres na célula, levando-os até os ribossomos, onde eles se unem para formar a molécula polipeptídica. Cada RNAt apresenta, em uma determinada região de sua molécula, uma trinca de bases denominada **anticódon**. O aminoácido transportado por um RNAt depende de seu anticódon. Por exemplo, moléculas de RNAt com anticódon **AAA** ou **AAG** transportam sempre o aminoácido **fenilalanina**; os RNAt com anticódons **CCA**, **CCG**, **CCU** ou **CCC** transportam somente glicina.

Os **RNA mensageiros** são cópias dos genes codificadores de proteínas e contêm, em sua seqüência de bases nitrogenadas, as instruções sobre a ordem em que os aminoácidos devem ser unidos para produzir determinado polipeptídio. O RNAt, com seu respectivo aminoácido, acopla-se ao ribossomo, ao qual já está associado a uma molécula de RNAm. Para que um RNAt possa acoplar-se ao ribossomo, é necessário que este se encontre exatamente sobre uma trinca do RNAm, denominada **códon**, complementar ao anticódon do RNAt. A seqüência de códons presente no RNAm determina a ordem em que os RNAt vão se acoplando, enquanto o ribossomo desliza sobre o RNAm. À medida que os RNAt se acoplam aos ribossomos, os aminoácidos associados a estes vão se unindo para constituir a cadeia polipeptídica. **(Fig. 7.13)**

◀ **Figura 7.13** • Representação da relação entre DNA, RNAm e a proteína.

O código genético

As informações para fabricar polipeptídios estão inscritas na molécula de DNA em uma linguagem codificada, denominada **código genético**. Nessa codificação, cada trinca de bases de uma das cadeias do DNA corresponde a um aminoácido na proteína codificada.

Na década de 1960, o cientista Marshall Nirenberg descobriu que a trinca de bases UUU do RNAm corresponde ao aminoácido fenilalanina e, assim, abriu caminho para a decifração da linguagem da vida. Cinco anos mais tarde todo o código genético estava decifrado. A decifração da linguagem codificada nos genes reafirmou a unidade do mundo vivo e reforçou a idéia de que todas as espécies de seres vivos atuais, inclusive a nossa, descendem de ancestrais comuns. Das algas microscópicas às grandes árvores, dos microrganismos à espécie humana, a linguagem da vida é surpreendentemente a mesma (relembre o código genético e a síntese de proteínas no capítulo 11 do volume 1 desta coleção).

7.4 Organização dos genes procariótico e eucariótico

O que é um gene?

O termo **gene** foi criado pelo pesquisador dinamarquês Wilhem Ludvig Johannsen, em 1909. Desde então, muitas definições de gene foram propostas. Nesta coleção, definimos gene como "um segmento de DNA com informação para a síntese de um polipeptídio ou de um RNA". Por exemplo, de acordo com essa definição, o segmento de DNA humano que codifica a cadeia alfa da hemoglobina é um gene, e o que codifica a cadeia beta é outro gene. Os segmentos de DNA que codificam cada um dos RNAt também são considerados genes, assim como os que codificam as moléculas de RNAr. Todo gene expressa-se, portanto, por meio da **transcrição gênica**, como é denominado o processo de síntese de RNA que tem por modelo o DNA.

Unidade de transcrição gênica

Podemos definir **unidade de transcrição gênica** como um segmento de DNA que é transcrito de forma contínua em uma molécula de RNA. Esse segmento de DNA caracteriza-se por apresentar uma seqüência especial de bases nitrogenadas, a **região promotora** (ou apenas **promotor**), na qual se encaixa a enzima **polimerase do RNA**, responsável pela transcrição. O término da unidade de transcrição gênica é definido por outra seqüência especial de bases nitrogenadas, denominada **seqüência de término de transcrição**, que determina o desligamento da polimerase do RNA da molécula de DNA-modelo, completando o processo.

A transcrição de um RNA tem início quando uma polimerase do RNA se encaixa na região promotora e

separa, nesse local, as duas cadeias da molécula de DNA. A enzima passa, então, a orientar o encaixe de ribonucleotídios (nucleotídios do RNA, cuja pentose é a ribose) nas bases de uma das cadeias do DNA, unindo-os à medida que os ordena na cadeia de DNA-modelo. Ao atingir a seqüência sinalizadora de término de transcrição, a polimerase solta-se do DNA e a transcrição termina. Dessa forma, a polimerase do RNA percorre o segmento de DNA e copia uma de suas cadeias em uma molécula de RNA, cuja seqüência de bases nitrogenadas é rigorosamente complementar à da cadeia de DNA que serviu de modelo. **(Fig. 7.14)**

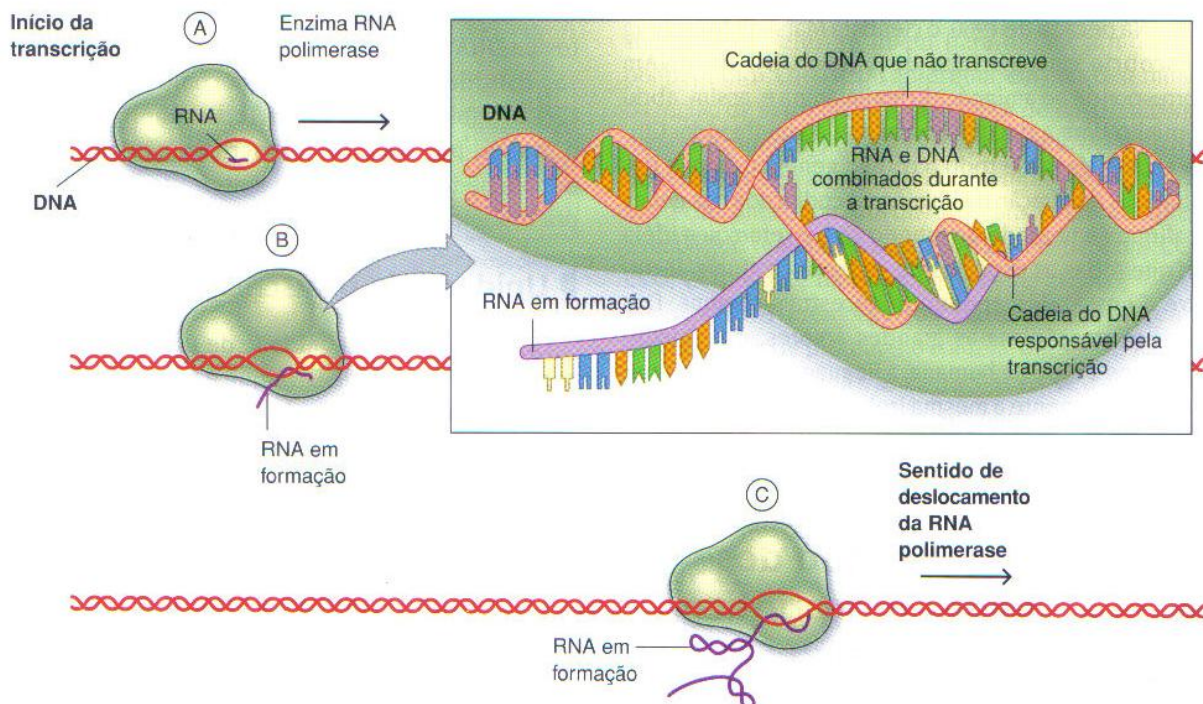
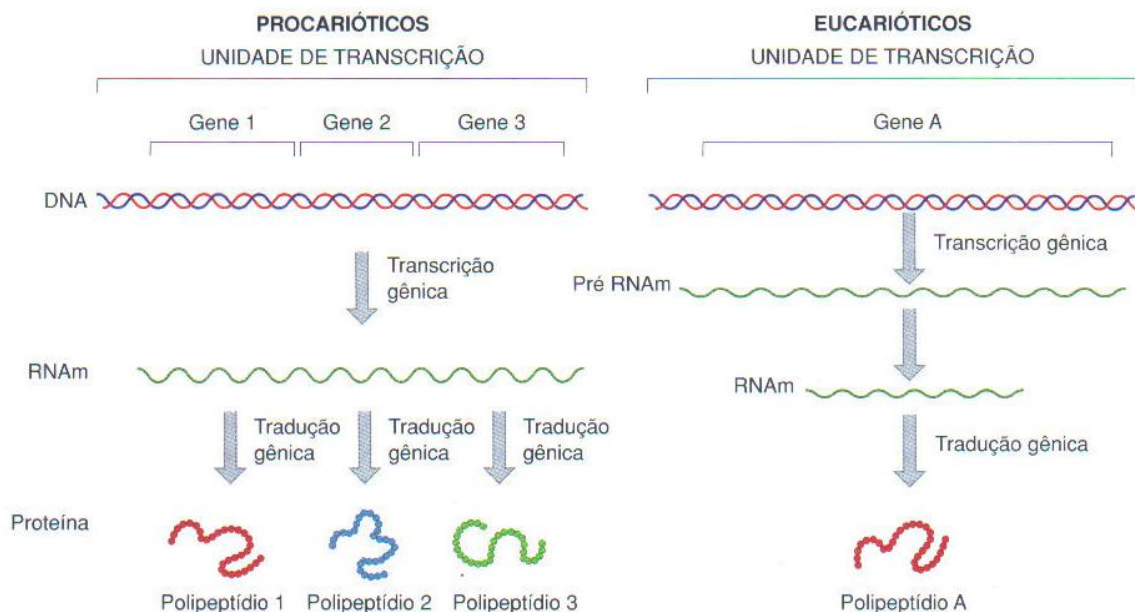
Em bactérias, a molécula de RNAm transcrita contém, em geral, instrução para a síntese de mais de uma cadeia polipeptídica, correspondendo, portanto, a mais de um gene. Por exemplo, em *Escherichia coli*, os genes que codificam as enzimas beta-galactosidase, galactosídio-permease e acetilase são transcritos em uma única molécula de RNAm. Os ribossomos traduzem as regiões desse RNAm, correspondentes a cada um dos genes, de modo independente, e geram três polipeptídios diferentes, que constituem as três enzimas. Nos organismos eucarióticos, a regra é cada RNAm conter instrução para um único tipo de polipeptídio, correspondendo, portanto, a um único gene. **(Fig. 7.15)**

Diferenças entre genes bacterianos e genes eucarióticos

Genes interrompidos dos organismos eucarióticos

Em bactérias, a seqüência de aminoácidos de um polipeptídio corresponde exatamente à seqüência de bases do segmento de DNA que foi transcrito para o RNAm. Os cientistas costumam dizer, por isso, que em bactérias há **colinearidade** entre as cadeias polipeptídicas e os segmentos de DNA que as codificam.

Nos organismos eucarióticos a situação é diferente; a maioria das cadeias polipeptídicas não é perfeitamente colinear à seqüência de bases do DNA que as codifica. A razão disso é que a instrução para a síntese de proteínas nos genes eucarióticos é geralmente interrompida por trechos da molécula que não codificam aminoácidos.

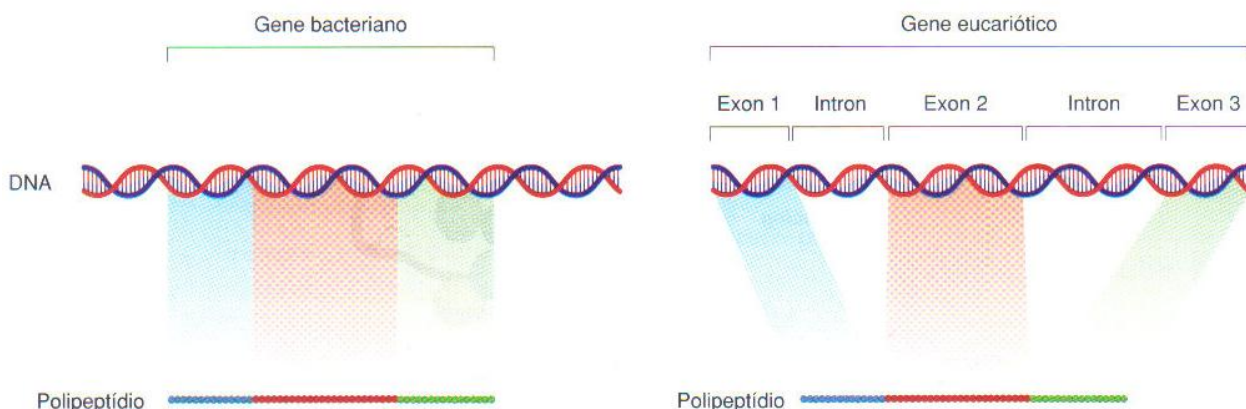
Uma analogia pode ajudar a compreender esses conceitos de genes interrompidos e de genes não-interrompidos. Imagine o texto de um livro, que contenha uma dada informação e que possa ser lido sem interrupções; podemos compará-lo a uma instrução genética bacteriana, em que a seqüência de bases do DNA corresponde exatamente à seqüência de aminoácidos da proteína. Imagine agora o que acontece se in-

▲ **Figura 7.14** • Representação de polimerase do RNA em três etapas sucessivas (A, B e C) da transcrição gênica. No quadro, detalhe da correspondência entre as seqüências de bases nitrogenadas do RNA transcrito e do DNA-modelo. A síntese de RNA é chamada de transcrição gênica porque a seqüência de bases codificada em uma das cadeias do DNA é transcrita para o RNA.

▲ **Figura 7.15** • À esquerda, representação de uma unidade de transcrição em bactéria, que contém instrução para a síntese de três enzimas diferentes. À direita, representação de uma unidade de transcrição típica de organismos eucarióticos, que contém instrução para um único polipeptídio.

troduzirmos, em determinados pontos desse texto, palavras, frases ou parágrafos sem sentido; a informação original continua lá, mas interrompida por trechos sem significado, que têm de ser eliminados para que a informação seja compreendida. Essa segunda situação é análoga aos genes eucarióticos, nos quais a instrução genética é interrompida por seqüências de nucleotídios desprovidos de qualquer informação para a síntese de polipeptídios.

Introns e exons

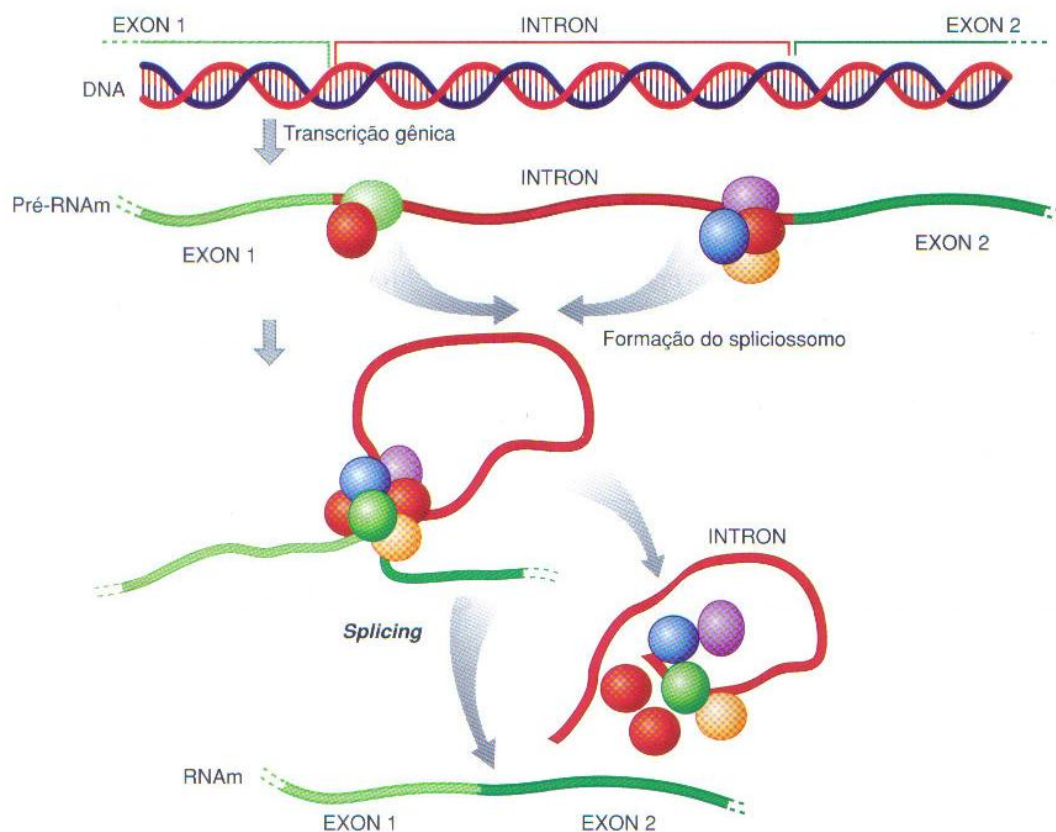
Em uma unidade de transcrição de um organismo eucariótico há trechos que serão traduzidos em seqüências de aminoácidos e trechos intercalares, que não serão traduzidos. Em 1978, o geneticista norte-americano Walter Gilbert (n. 1932) propôs os termos **exon** (do inglês ***expressed region***, região expressa) para designar as regiões de um gene que são traduzidas em seqüências de aminoácidos, e **introns** (do inglês ***intragenic region***, região intragênica) para designar as regiões não traduzidas, localizadas entre os exons. **(Fig. 7.16)**

Splicing genético: corte e emenda do RNA

A polimerase do RNA, ao percorrer uma unidade de transcrição eucariótica, transcreve tanto as regiões dos exons quanto as dos introns, produzindo uma molécula de RNAm correspondente a toda unidade de transcrição. Essa molécula de RNA recém-transcrita é chamada de **pré-RNA mensageiro** (ou RNA heterogêneo, devido ao seu grande tamanho).

▲ **Figura 7.16** • Representação da organização de um gene não-interrompido de uma bactéria e de um gene interrompido de organismo eucariótico.

Ainda dentro do núcleo, a molécula de RNA recém-sintetizada passa por uma série de modificações químicas até ser transformada no RNAm que irá para o citoplasma, onde participa da síntese da proteína. Entre as modificações pelas quais passa o RNA pré-mensageiro, a mais notável é a remoção dos introns, ou seja, das porções que não codificarão aminoácidos na proteína a ser produzida. O processo de remoção dos introns de uma molécula de RNA pré-mensageiro recebeu a denominação, em inglês, de ***splicing***, termo que poderia ser traduzido por "**corte e emenda**".

O processo de corte e emenda do RNA pré-mensageiro é realizado por um complexo de partículas e enzimas nucleares conhecido como **spliciossomo**. As partículas que compõem o spliciossomo são constituídas por proteínas e por pequenas moléculas de um tipo especial de RNA, conhecido com ***sn*RNA** (do inglês ***small nuclear* RNA**, pequenos RNA nucleares). No *splicing* do RNA, partes do spliciossomo reconhecem as duas extremidades de um intron e se ligam a elas. Em seguida, as partículas spliossômicas se unem, aproximando as extremidades do intron. A molécula de RNA pré-mensageiro é, então, cortada nos limites entre o intron e os dois exons adjacentes, os quais são imediatamente unidos entre si. Após a eliminação de todos os introns, o RNA constituído apenas por exons e, portanto, com a instrução genética devidamente "editada", passa para o citoplasma, onde se reúne aos ribossomos para ser traduzido em proteína. Enquanto todos os introns não forem eliminados do RNA, este não consegue sair do núcleo; isso impede que mensagens ainda não completamente editadas sejam eventualmente traduzidas pelos ribossomos. **(Fig 7.17)**

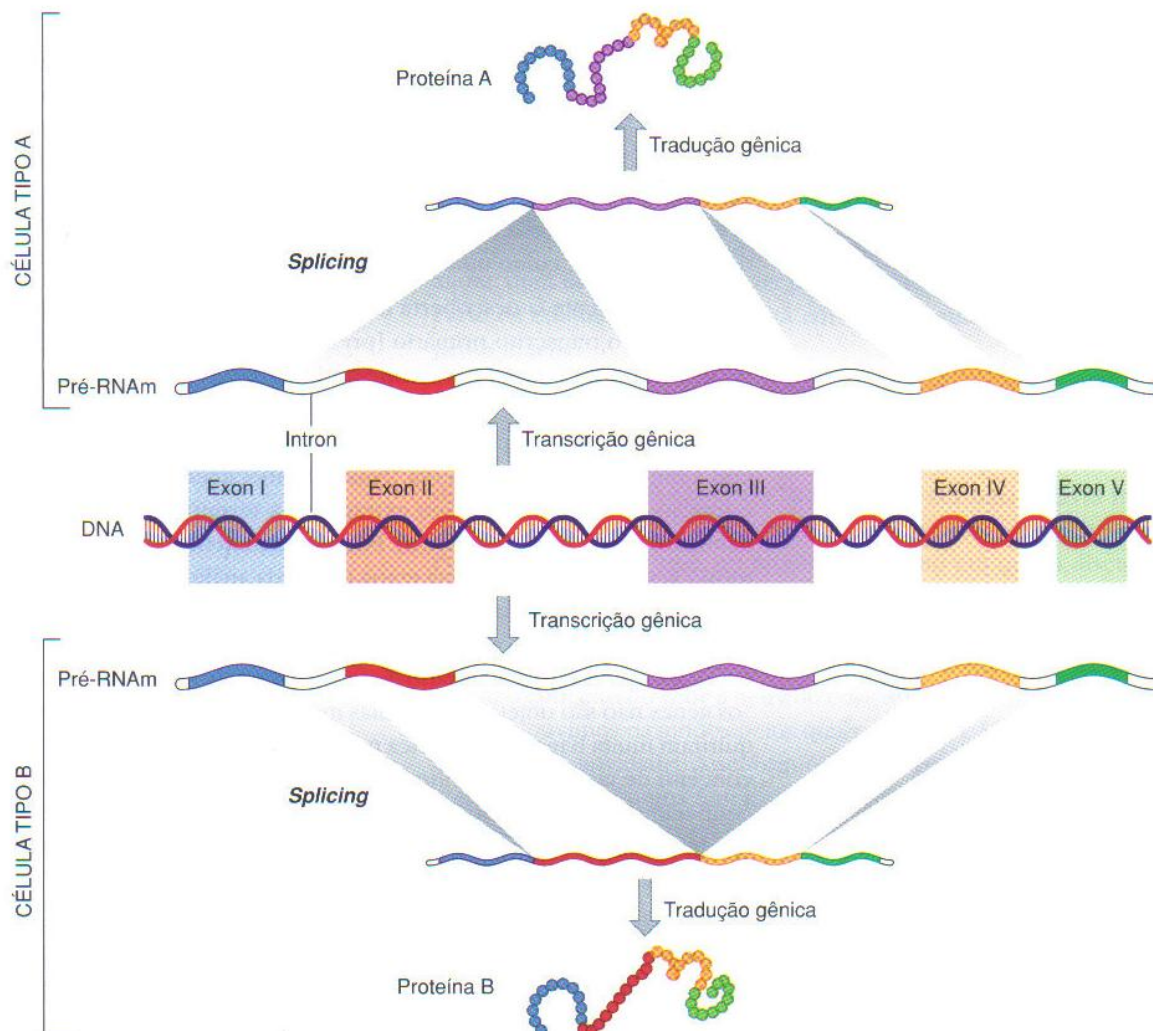
Os cientistas ainda não conseguiram explicar por que os genes eucarióticos são interrompidos. Essa situação é paradoxal, tendo-se em vista que os introns são rapidamente degradados a nucleotídios, após serem removidos dos RNA pré-mensageiros. Os cientistas se perguntam: não parece um desperdício de energia sintetizar todo o RNA para picotá-lo em seguida? Uma situação extrema desse picotamento é encontrada, por exemplo, no gene que codifica a proteína distrofina, presente nos músculos. O RNA pré-mensageiro da distrofina tem 2 milhões de nucleotídios e 78 introns, cuja remoção origina um RNAm com apenas 14 mil nucleotídios. Na maioria das situações, a quantidade de introns é bem menor, mas, mesmo assim, os exons constituem menos da metade de um RNA pré-mensageiro. Explicar a função dos introns tem sido um desafio para os cientistas,

▲ **Figura 7.17** • Esquema do processo de corte e emenda (*splicing*) que ocorre na formação dos RNAm dos organismos eucarióticos.

mas algumas descobertas apontam para certas vantagens desse sistema sobre o sistema bacteriano, como veremos a seguir.

Splicing alternativo do RNA

O Projeto Genoma Humano, que consistiu na determinação da seqüência de bases nitrogenadas do DNA dos 24 tipos de cromossomos humanos (22 autossomos e os cromossomos sexuais X e Y, estimou entre 30 mil e 40 mil o número de genes de nossa espécie. No entanto, sabemos que o corpo humano contém, no mínimo, entre 100 mil e 150 mil tipos diferentes de proteína. Como explicar essa disparidade? Não deveria haver um gene para cada polipeptídio?

Os cientistas descobriram que uma mesma molécula de pré-RNA mensageiro pode sofrer tipos diferentes de *splicing* em diferentes tipos celulares. Em outras palavras, nos diferentes tipos de célula pode haver diferentes tipos de segmentos eliminados, de modo que o mesmo pré-RNA mensageiro é cortado e montado de diferentes maneiras, dependendo do tipo de célula. Esse fenômeno é chamado de ***splicing* alternativo**. **(Fig. 7.18)**

Os cientistas calculam que mais de 60% dos genes humanos apresentam *splicing* alternativo, o que explicaria porque o número de tipos de proteínas humanas é tão superior ao número de genes. Em *Drosophila melanogaster* foi descoberto um gene que pode originar milhares de RNAm diferentes por meio do *splicing* alternativo. Esse gene, conhecido pela sigla *Dscam*, é constituído por 115 exons e por um número correspondente de introns; as proteínas codificadas por seus RNA mensageiros localizam-se na membrana dos axônios das células nervosas da mosca e são responsáveis por conectar essas células entre si, participando da transmissão dos impulsos nervosos.

▲ **Figura 7.18** • Representação do processo de *splicing* alternativo de um pré-RNA mensageiro (no centro) em dois tipos de célula, o que resulta em dois tipos diferentes de proteína, A e B. Na célula A, o exon II foi removido pelo *splicing*; assim, esse segmento não está presente no RNAm e, portanto, não codifica aminoácidos na proteína. Na célula B, por outro lado, o *splicing* removeu o exon III.

LEITURA

UM CONCEITO EM APUROS

Quinze anos atrás, o historiador e filósofo da Biologia Richard Burian observou:"Há um fato estabelecido sobre a estrutura do DNA, mas não há nenhum fato estabelecido sobre o que é o gene". Nesse ínterim, as coisas só pioraram. Como resultado do progresso espetacular na identificação, mapeamento e seqüenciamento de determinados genes, aprendemos uma quantidade imensa de fatos sobre a estrutura e a função do material genético, e muito do que aprendemos fica fora da moldura do nosso quadro original. As complicações criadas pelos novos dados são imensas [...]. Tomadas em seu conjunto, elas ameaçam colocar o próprio conceito de "o gene" — quer como uma unidade de estrutura, quer como unidade de função — em flagrante desmantelamento.

Técnicas e dados da análise do seqüenciamento levaram à identificação não apenas de genes interrompidos, mas também de genes repetidos, genes superpostos, DNA críptico, transcrição reversa, genes nidados e promotores múltiplos (permitindo que a transcrição se inicie em locais alternativos e de acordo com critérios variáveis). Todas essas variações confundem de forma desmedida a tarefa de definir o gene como uma unidade estrutural.

Similarmente, a descoberta de um elaborado processo de edição ao qual o transcrito primário [pré-RNA mensageiro] é submetido, de mecanismos regulatórios operando ao nível da síntese de proteínas, e outros ainda operando no nível da função de proteínas, confunde nossos esforços para dar ao gene uma definição funcional precisa. Como Peter Portin observa:"Nosso conhecimento da estrutura e função do material genético extrapolou a terminologia tradicionalmente usada para descrevê-lo. Pode-se argumentar que o antigo termo gene, essencial em uma etapa inicial da análise, não seja mais útil". William Gelbart, trabalhando na vanguarda da genética molecular, concorda ao sugerir que o gene pode ser "um conceito cuja época passou"."Ao contrário dos cromossomos", escreve Gelbart, "os genes não são objetos físicos mas meramente conceitos que adquiriram muita bagagem histórica nas últimas décadas. "Claro que o conceito de gene desempenhou um papel crucial em nos trazer ao conhecimento atual dos fenômenos biológicos, mas hoje, ele sugere, "podemos bem ter chegado ao ponto em que o uso do termo 'gene' ... pode de fato ser um obstáculo ao nosso entendimento".

Existe mais que um pouco de ironia no atual estado das coisas, pois nunca na história do gene o termo teve tanta proeminência, tanto na imprensa científica quanto na leiga. Diariamente somos informados da identificação de novos genes "causadores de doenças", e a lista das doenças "genéticas" correspondentes cresce a cada dia. Da mesma forma, dizem-nos que muito da conduta humana antes

imaginada como voluntária, ou culturalmente induzida, é um produto de nossos genes. Certamente fez-se um progresso espantoso na compreensão da importância de mutações genéticas na incidência de muitas doenças (incluindo alguns distúrbios da conduta). Um certo número de condições mórbidas foi definitivamente associado a mutações em genes específicos. Os casos mais simples e claros são os distúrbios em genes únicos (Tay-Sachs, doença de Huntington, fibrose cística, talassemia e fenilcetonúria [PKU], entre outras). Tais exemplos, no entanto, continuam raros, e mesmo nesses casos bem demarcados, muito ainda precisa ser compreendido sobre o processo que liga o gene defeituoso ao desencadeamento da doença.

Em condições que sabidamente envolvem a participação de muitos genes (tais como certos tipos de doenças cardíacas, acidentes vasculares cerebrais, psicoses, diabetes), as limitações do entendimento atual são ainda mais notáveis. O efeito final é que, muito embora tenhamos nos tornado extraordinariamente eficientes em identificar riscos genéticos, a possibilidade de benefícios médicos significativos — benefícios que há apenas uma década esperava-se que surgissem logo depois, nos calcanhares das novas técnicas de diagnóstico — recua para um futuro cada vez mais distante. Como escreve D. J. Weatherall, diretor do Instituto de Medicina Molecular da Universidade de Oxford: "Transferir genes para um novo ambiente e seduzi-los a ... fazer seu trabalho, com todos os mecanismos regulatórios sofisticados que estão envolvidos, tem-se mostrado, até agora, uma tarefa difícil demais para os geneticistas moleculares". Parte da dificuldade, é claro, está em compreender o que é que os genes *fazem*.

Em outras palavras, por trás da chamada disparidade terapêutica entre diagnóstico genético e benefícios médicos, está a complexidade da dinâmica regulatória que agora coloca o próprio conceito de gene em risco. Na realidade, "ironia" pode ser uma palavra fraca demais para descrever as incongruências de nossa situação atual. Pois o fato básico é que, no momento mesmo em que o discurso sobre os genes passou a dominar tão poderosamente nosso discurso biológico, as façanhas das novas técnicas analíticas na biologia molecular e todo o peso das descobertas que elas propiciaram trouxeram o conceito do gene à beira do colapso. O que é um gene hoje? Quando ouvimos os modos pelos quais o termo é hoje usado pelos biólogos em atividade, descobrimos que o gene se tornou muitas coisas — não mais uma única entidade, mas uma palavra de grande plasticidade, definida somente pelo contexto experimental específico no qual é utilizada.

- **Fonte:** Evelyn Fox Keller. *O século do gene*. Belo Horizonte: Crisálida, 2002. p. 79-81. *(Adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

7.1 A natureza química dos genes

1. Qual foi o fato que, há cerca de 50 anos, desencadeou os importantes progressos ocorridos no estudo do DNA? Cite alguns desses progressos.

Quadro 7.1 Breve história da caracterização molecular do DNA

2. Quando, como e por quem foi descoberto o DNA?
3. Qual foi a contribuição de Rosalind Franklin para a elucidação da estrutura do DNA?
4. Que característica da molécula de DNA explica as relações A/T = 1 e C/G = 1 encontradas por Chargaff em sua análises de DNA?
5. Que características do modelo proposto por Watson e Crick para a molécula de DNA contribuíram para sua aceitação?
6. Descreva sucintamente a descoberta da transformação bacteriana.
7. O que levou Avery e seus colaboradores à conclusão de que o princípio responsável pela transformação bacteriana era o DNA?
8. Como Hershey e Chase conseguiram demonstrar que o DNA é o material hereditário dos bacteriófagos?

7.2 A descoberta do modo de ação dos genes

9. Como surgiu a idéia de que os genes atuam por meio de enzimas e, assim, controlam as reações químicas nos organismos?
10. O que é fenilcetonúria?
11. Qual é a causa do albinismo tipo 1?
12. Descreva brevemente as idéias de Beadle e Tatum relativas ao comportamento de mutantes de *Neurospora*, de acordo com a teoria um gene — uma enzima.
13. Descreva sucintamente o trabalho de Beadle e Tatum realizado com *Neurospora*.
14. Qual é a premissa básica da teoria um "gene — um polipeptídio"?

7.3 Relação entre gene, RNA e proteína

15. Que relação existe entre gene, RNA e proteína?
16. Quais são os tipos de RNA diretamente envolvidos na síntese das proteínas e que funções eles executam nesse processo?
17. Conceitue unidade de transcrição.
18. Descreva brevemente o processo da transcrição gênica.
19. Relacione unidade de transcrição e gene, em bactérias e em organismos eucarióticos.
20. Qual é o significado da expressão "gene interrompido", em referência à estrutura dos genes eucarióticos?
21. Conceitue os termos exon e intron.
22. Descreva brevemente o processo de *splicing* do RNA.
23. O que é *splicing* alternativo?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 24 a 27.

a) Erwin Chargaff.
b) Francis H. C. Crick.
c) Friedrich Miescher.
d) Rosalind Franklin.

24. Quem foi o descobridor da substância que mais tarde foi chamada de ácido desoxirribonucléico (DNA)?
25. Qual pesquisador foi responsável pelos estudos de difração de raios X que demonstraram a estrutura helicoidal da molécula de DNA?
26. Quem foi um dos proponentes do modelo em dupla-hélice para a molécula de DNA?
27. Qual pesquisador demonstrou que as relações A/T e C/G no DNA são iguais a 1?
28. Em que evidência Avery e seus colaboradores se basearam para concluir que a substância responsável pela transformação bacteriana era o DNA?
    a) As bactérias transformadas passaram a apresentar DNA em sua constituição.
    b) O extrato bacteriano perdem seu poder transformante quando aquecido.
    c) O extrato bacteriano perdem seu poder transformante quando tratado com DNase.
    d) O fato de o fósforo radioativo presente no extrato ser detectado nas bactérias transformadas.
29. Hershey e Chase utilizaram isótopos radioativos para marcar os componentes das partículas virais e seguir a trajetória de cada uma delas no processo de infecção da bactéria. Que isótopos eles utilizaram para distinguir as substâncias virais?
    a) Isótopo de nitrogênio para marcar as proteínas e de enxofre para marcar o DNA.
    b) Isótopo de nitrogênio para marcar as proteínas e de fósforo para marcar o DNA.
    c) Isótopo de enxofre para marcar as proteínas e de fósforo para marcar o DNA.

d) Isótopo de enxofre para marcar as proteínas e de nitrogênio para marcar o DNA.
e) Isótopo de fósforo para marcar as proteínas e de enxofre para marcar o DNA.

30. Os fenilcetonúricos devem evitar ingerir alimentos como carne, ovos e leite entre outros porque eles são ricos em
a) alcaptona.
b) fenilalanina.
c) fenil-piruvato.
d) tirosina.

31. Alcaptonúria, fenilcetonúria e albinismo tipo 1 são doenças resultantes de alterações no metabolismo chamadas de erros inatos do metabolismo porque
a) são doenças genéticas em que o portador já nasce com o fenótipo alterado.
b) não são doenças genéticas, mas derivadas da ausência de enzimas metabólicas.
c) são doenças genéticas derivadas da ausência de enzimas metabólicas.
d) as pessoas portadoras dessas doenças nascem com o fenótipo alterado, mas a causa pode ser genética ou não.

32. A polimerase do RNA é uma enzima que
a) sintetiza a base nitrogenada uracila.
b) atua na síntese dos ribonucleotídios.
c) sintetiza RNA a partir de um DNA.
d) promove a união entre desoxirribonucleotídios.

33. A seqüência de bases nitrogenadas do DNA à qual se liga a polimerase do RNA, para iniciar síntese de RNA, é chamada de
a) anticódon.
b) códon.
c) região promotora.
d) seqüência de término de transcrição.

34. O RNA transportador (RNAt) é sintetizado
a) no cromossomo, tendo como modelo o DNA.
b) no cromossomo, tendo como modelo proteínas.
c) no ribossomo, tendo como modelo o RNAr.
d) no nucléolo, tendo como modelo o RNAm.

35. O RNA mensageiro (RNAm) é sintetizado
a) no cromossomo, tendo como modelo o DNA.
b) no cromossomo, tendo como modelo proteínas.
c) no ribossomo, tendo como modelo o RNAr.
d) no nucléolo, tendo como modelo o RNAm.

36. Um segmento de DNA delimitado por uma região promotora e por uma seqüência de término de transcrição é sempre
a) um códon.
b) um anticódon.
c) um gene.
d) uma unidade de transcrição.

37. Uma molécula de RNA mensageiro capaz de codificar duas ou mais cadeias polipépticas é típica de
a) célula bacteriana.
b) célula eucariótica.
c) tanto de célula bacteriana quanto de célula eucariótica.
d) de seres com mutações cromossômicas

38. Um RNA que apresenta em sua estrutura seqüências de bases nitrogenadas que serão traduzidas em seqüências de aminoácidos, intercaladas com seqüências de bases nitrogenadas que não serão traduzidas em proteínas, é típico de células
a) bacterianas.
b) eucarióticas e está presente apenas no citoplasma.
c) eucarióticas e está presente apenas no núcleo.
d) eucarióticas e está presente tanto no núcleo quanto no citoplasma.

39. O spliciossomo é um complexo de RNA e proteínas encontrado
a) em qualquer tipo celular.
b) apenas em bactérias.
c) apenas no núcleo de células eucarióticas.
d) apenas no citoplasma de células eucarióticas.

QUESTÕES DISCURSIVAS

40. Um dos alelos que condiciona o albinismo resulta da troca de um par de bases no DNA, que determina a substituição de um aminoácido na enzima tirosinase, tornando-a inativa. Com base nessas e em outras informações do texto, explique por que um indivíduo heterozigótico, portador de um alelo normal e de um alelo anormal do gene do albinismo, tem pigmentação normal de pele.

41. *Neurospora*, uma espécie de fungo, conhecida vulgarmente como bolor rosado do pão, sintetiza o aminoácido arginina, essencial à sua sobrevivência, a partir da substância citrulina. Esta é produzida a partir da ornitina, a qual, por sua vez, é produzida a partir do semi-aldeído glutâmico. Assim, a cadeia de reações que leva à síntese da arginina pode ser escrita como abaixo:

semi-aldeído glutâmico —(Reação 1)→ ornitina —(Reação 2)→ citrulina —(Reação 3)→ arginina

A reação 1 é catalisada por uma enzima produzida pelo gene *A*; a reação 2, por uma enzima produzida pelo gene *B*; e a reação 3, por uma enzima produzida pelo gene *C*. Os mutantes *a*, *b* e *c* desses genes produzem enzimas inativas, incapazes de catalisar essas reações, o que torna o indivíduo incapaz de produzir arginina e, portanto, incapaz de sobreviver com o alimento básico (meio mínimo). Um mutante I, incapaz de sobreviver em meio de cultura normal (meio mínimo) por ser portador de um dos defeitos genéticos

mencionados, desenvolvia-se normalmente quando seu meio de cultura era suplementado com arginina, ou, em vez de arginina, com citrulina. Ele não sobreviveria, entretanto, se, em vez de uma dessas duas substâncias, lhe fosse fornecida apenas ornitina ou semialdeído glutâmico.

Um mutante II, também portador de um dos defeitos genéticos mencionados acima, desenvolvia-se normalmente quando seu meio de cultura era suplementado ou com arginina ou com citrulina ou com ornitina, porém não sobreviveria se, em vez de um desses três compostos, lhe fosse fornecido apenas o semi-aldeído glutâmico. Um mutante III, também portador de um dos defeitos genéticos mencionados, só conseguia crescer na presença de arginina; a adição de qualquer um dos outros três compostos ao meio de cultura era incapaz de promover seu crescimento.

Com base nessas informações, determine que tipo de mutação provavelmente está presente em cada um dos três indivíduos (I, II e III). Justifique sua resposta.

42. Atualmente é possível retirar genes de um organismo eucariótico, introduzi-los em células bacterianas e fazer com que esses genes sejam transcritos e traduzidos pela célula do microrganismo. Pelo que aprendeu sobre a estrutura dos genes eucarióticos, você acha que, por meio do transplante direto de genes humanos em bactérias, seria possível obter alguma proteína humana como, por exemplo, uma das cadeias da hemoglobina?

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

43. (UFPI) Se uma proteína possui 100 aminoácidos, quantos códons, que especificam esses aminoácidos, devem estar presentes no seu RNAm?

a) 100
b) 33
c) 99
d) 300
e) 500

44. (Vunesp) Erros podem ocorrer, embora em baixa freqüência, durante os processos de replicação, transcrição e tradução do DNA. Entretanto, as conseqüências desses erros podem ser mais graves, por serem herdáveis, quando ocorrem

a) na transcrição, apenas.
b) na replicação, apenas.
c) na replicação e na transcrição, apenas.
d) na transcrição e na tradução, apenas.
e) em qualquer um dos três processos.

45. (PUC-MG)

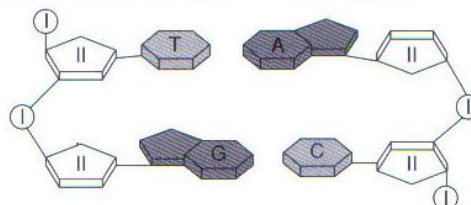
CHIMPANZÉ TAMBÉM É "GENTE", DIZ ESTUDO.
Alguns cientistas dos EUA afirmam que os chimpanzés (*Pan troglodites*) são geneticamente tão parecidos com os homens que deveriam ser incluídos no gênero *Homo*, que até o momento tem o *Homo sapiens* como único representante vivo.

A idéia surgiu pela primeira vez em 1998 quando a análise de seqüências de DNA de humanos e de chimpanzés revelou 98,4% de identidade. Mais recentemente, a comparação da seqüência de DNA de 97 genes comuns de humanos e de chimpanzés revelou 99,4% de identidade entre os genes humanos e de chimpanzés. A diferença nos percentuais de identidade dos dois estudos se deve ao fato de que em 1998 foi estudado o DNA não-codificante, que não faz parte das seqüências que podem ser transcritas e traduzidas. Na realidade, biologicamente não somos tão diferentes dos chimpanzés como muitos crêem. Estudar estes 0,6% de diferenças pode contribuir para entendermos como, nos 6 milhões de anos que separam a evolução do homem e do chimpanzé de um ancestral comum, apenas um deles desenvolve a capacidade de compor música, de construir prédios e de fazer pesquisa científica.

(Fonte: *Folha de S.Paulo*, em 21/05/2003.)

Tendo em vista o texto apresentado, assinale a afirmativa CORRETA.

a) As espécies *Homo sapiens* e *Pan troglodites* surgiram há 6 milhões de anos.
b) 99,4% dos genes apresentam a mesma seqüência de DNA.
c) Seqüências de DNA que podem ser expressas como proteínas apresentaram maiores semelhanças que as seqüências não codificadoras.
d) Os 97 genes comuns são os responsáveis pelas diferenças entres seres humanos e chimpanzés.

46. (UFPE) Considerando que na figura a seguir tem-se uma representação plana de um segmento da molécula de DNA, analise as proposições a seguir.

1) Um nucleotídeo é formado por um grupo fosfato (I), uma molécula do açúcar desoxirribose (II) e uma molécula de base nitrogenada.
2) Um nucleotídeo com Timina (T) em uma cadeia pareia com um nucleotídeo com Adenina (A) em outra cadeia.
3) Um nucleotídeo com Guanina (G) em uma cadeia pareia com um nucleotídeo com Citosina (C) em outra cadeia.
4) Pontes de hidrogênio se estabelecem entre as bases nitrogenadas T e A e entre as bases nitrogenadas C e G.

Está(ão) correta(s):

a) 1 apenas;
b) 2 e 3 apenas;
c) 1, 2 e 3 apenas;
d) 2, 3 e 4 apenas;
e) 1, 2, 3 e 4.

47. (Fuvest-SP) Qual das alternativas se refere a um cromossomo?

a) Um conjunto de moléculas de DNA com todas as informações genéticas da espécie.
b) Uma única molécula de DNA com informação genética para algumas proteínas.
c) Um segmento de molécula de DNA com informação para uma cadeia polipeptídica.
d) Uma única molécula de RNA com informação para uma cadeia polipeptídica.
e) Uma seqüência de três bases nitrogenadas do RNA mensageiro correspondente a um aminoácido na cadeia polipeptídica.

48. (UFMG) Um laboratório recebeu três amostras de DNA para investigar se pertenciam a espécies diferentes.
A quantidade e a relação entre as bases das amostras estão apresentadas nesta tabela:

Amostras	Bases nitrogenadas (%)				Relações molares	
	A	G	C	T	A/T	G/C
1	30,9	19,9	19,8	29,4	1,05	1,01
2	25,0	24,0	33,0	18,0	1,39	0,73
3	47,3	2,7	2,7	47,3	1,00	1,00

Com base nas informações dessa tabela e em outros conhecimentos sobre o assunto, é INCORRETO afirmar que

a) as três amostras são provenientes de diferentes espécies.
b) a amostra 3 possui o mais alto conteúdo de pares de bases A e T.
c) a amostra 2 apresenta DNA de fita simples.
d) as amostras 1 e 3 apresentam alta homologia entre seus DNAs.

49. (UFRS) Cinco amostras com ácidos nucléicos foram analisadas quimicamente e apresentaram os seguintes resultados:

I. 1ª amostra: ribose
II. 2ª amostra: timina
III. 3ª amostra: dupla hélice
IV. 4ª amostra: uracila
V. 5ª amostra: 20% de guanina e 30% de citosina

Entre estas amostras, quais se referem a DNA?

a) Apenas I e II.
b) Apenas I e III.
c) Apenas II e III.
d) Apenas II e IV.
e) Apenas II e V.

50. (PUC-Campinas-SP) Considere as características do DNA abaixo discriminadas.

I. É constituído por uma única cadeia de nucleotídeos.
II. Seu açúcar é a desoxirribose.
III. Uma de suas bases nitrogenadas é a timina.
IV. Possui capacidade de autoduplicação.

São corretas

a) II e III, somente.
b) II e IV, somente.
c) I, III e IV, somente.
d) II, III e IV, somente.
e) I, II, III e IV.

51. (Fuvest) Em seu trabalho com ervilhas, publicado em 1866, Mendel representou os fatores hereditários determinantes dos estados amarelo e verde do caráter cor da semente pelas letras A e a, respectivamente. O conhecimento atual a respeito da natureza do material hereditário permite dizer que a letra A usada por Mendel simboliza

a) um segmento de DNA com informação para uma cadeia polipeptídica.
b) um segmento de DNA com informação para um RNA ribossômico.
c) um aminoácido em uma proteína.
d) uma trinca de bases do RNA mensageiro.
e) uma trinca de bases do RNA transportador.

52. (UFSM-RS) Numere a 2ª coluna de acordo com a 1ª

COLUNA 1
1- DNA
2- RNA

COLUNA 2
( ) dupla hélice
( ) ribose
( ) fita única ou simples
( ) desoxirribose
( ) bases nitrogenadas: adenina, guanina, citosina, timina.
( ) bases nitrogenadas: adenina, guanina, citosina, uracila

A seqüência correta é:

a) 1 - 2 - 1 - 2 - 2 - 1.
b) 2 - 1 - 1 - 2 - 2 - 2.
c) 1 - 2 - 2 - 1 - 1 - 2.
d) 2 - 1 - 2 - 1 - 1 - 2.
e) 1 - 1 - 2 - 2 - 2 - 1.

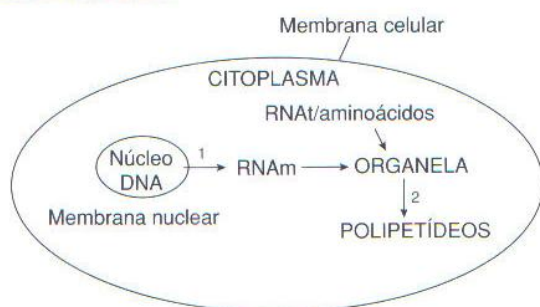
53. (Fuvest) Em um organismo, células musculares e células nervosas diferem principalmente por

a) possuírem genes diferentes.
b) possuírem ribossomos diferentes.
c) possuírem cromossomos diferentes.
d) expressarem genes diferentes.
e) utilizarem código genético diferente.

54. (PUC-SP) "O século XX proporcionou uma série de pesquisas na área genética.
Em 1928, Griffith realizou um importante experimento que envolvia transformações em bactérias. Esse experimento, retomado por Avery e colaboradores, em 1944, foi a base para a descoberta da molécula formadora do material genético.
Nos anos 50, Watson e Crick apresentaram o modelo da dupla-hélice dessa molécula, abrindo caminho para que, na década seguinte, se demonstrasse como o gene, através de sua seqüência de bases nitrogenadas, controla a produção de proteínas.
Nas duas últimas décadas, o avanço biotecnológico permitiu aos cientistas a manipulação do material genético e a transferência de um gene de uma espécie para outra."

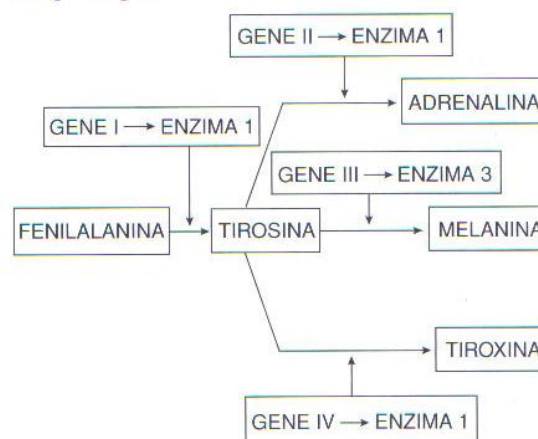
Considere os itens abaixo
I. estrutura da molécula do DNA;
II. descoberta do código genético;
III. DNA como molécula constituinte do gene;
IV. obtenção de organismos transgênicos.
O texto faz referência
a) apenas aos itens I, II e III.
b) apenas aos itens I, II e IV.
c) apenas aos itens I, III e IV.
d) apenas aos itens II, III e IV.
e) a todos os itens considerados.

55. (UFSCar-SP) Um pesquisador, interessado em produzir em tubo de ensaio uma proteína, nas mesmas condições em que essa síntese ocorre nas células, utilizou ribossomos de células de rato, RNA mensageiro de células de macaco, RNA transportador de células de coelho e aminoácidos ativos de células de sapo. A proteína produzida teria uma seqüência de aminoácidos idêntica à do
a) rato.
b) sapo.
c) coelho.
d) macaco.
e) macaco e do rato.

56. (Vunesp) Considere o diagrama, que resume as principais etapas da síntese de proteínas que ocorre numa célula eucarionte.

Os processos assinalados como 1 e 2 e a organela representados no diagrama referem-se, respectivamente, a
a) transcrição, tradução e ribossomo.
b) tradução, transcrição e lisossomo.
c) duplicação, transcrição e ribossomo.
d) transcrição, duplicação e lisossomo.
e) tradução, duplicação e retículo endoplasmático.

57. (UFC-CE) Sobre os diferentes papéis dos ácidos nucléicos na síntese de proteínas podemos afirmar corretamente que
a) a seqüência de bases no DNA determina a seqüência de aminoácidos na cadeia polipeptídica.
b) a posição dos aminoácidos na cadeia polipeptídica depende da seqüência de bases do RNAt.
c) o transporte de aminoácido para o local da síntese é feito pelo RNAm.
d) a seqüência de bases do RNAr é transcrita a partir do código do RNAm.
e) a extremidade livre dos diversos RNAt tem seqüências de bases diferentes.

58. (UFV) Além de serem as macromoléculas mais abundantes nas células vivas, as proteínas desempenham diversas funções estruturais e fisiológicas no metabolismo celular. Com relação a essas substâncias é CORRETO afirmar que
a) são todas constituídas por seqüências monoméricas de aminoácidos e monossacarídios.
b) além de função estrutural, são também as mais importantes moléculas de reserva energética e de defesa.
c) cada indivíduo produz as suas proteínas, que são codificadas de acordo com o seu material genético.
d) a sua estrutura terciária é determinada pela forma, mas não interfere na sua função ou especificidade.
e) são formadas pela união de nucleotídeos por meio dos grupamentos amina e hidroxila.

59. (Vunesp) O esquema representa alguns passos de uma série de reações metabólicas, onde quatro genes, I, II, III e IV, produzem quatro tipos diferentes de enzimas, 1, 2, 3 e 4, transformando o aminoácido fenilalanina em quatro possíveis substâncias.

Um indivíduo tem anomalias na pigmentação do corpo e seu metabolismo é prejudicado pela falta do hormônio da tireóide. O funcionamento das glândulas supra-renais, porém, é normal. De acordo com o esquema, os sintomas que o indivíduo apresenta ocorrem devido às alterações
a) no gene I, somente.
b) nos genes I e II, somente.
c) nos genes I e III, somente.
d) nos genes II e III, somente.
e) nos genes III e IV, somente.

60. (Fatec-SP) Analise o texto abaixo e assinale a alternativa que contém os termos que preenchem corretamente os espaços (I), (II), (III) e (IV).
"O controle das características fenotípicas dos seres vivos é feito pelos __(I)__ através do comando da síntese de __(II)__. No processo de elaboração de uma proteína ocorrem as etapas de transcrição e __(III)__. A primeira etapa forma a molécula de __(IV)__ contendo a mensagem genética e a segunda etapa é responsável pela produção da proteína."

a) ribossomos, proteínas, tradução, RNA transportador
b) ribossomos, aminoácidos, duplicação, RNA ribossômico
c) genes, aminoácidos, duplicação, RNA mensageiro
d) genes, proteínas, tradução, RNA mensageiro
e) genes, aminoácidos, cópia, RNA ribossômico

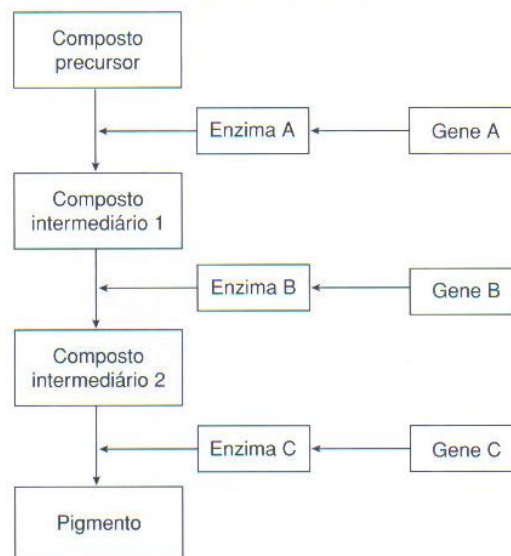
QUESTÕES DISCURSIVAS

61. (UFV) Considere a tabela abaixo, contendo códigos de trincas de bases do DNA com os aminoácidos correspondentes, para resolver os itens seguintes:

Trinca de bases	Aminoácido
AGG	△
CAA	○
TTA	⌂
CCG	■
TTC	◇

RNAm: ____________

a) Determine a seqüência de bases do RNAm que foi utilizado para sintetizar o polipeptídeo esquematizado abaixo da tabela.
b) Se ocorresse uma substituição, por uma purina, na 3ª base do código correspondente ao 6º aminoácido do polipeptídeo, qual seria o aminoácido da tabela a ser incorporado?
c) Qual é o anticódon correspondente ao novo aminoácido incorporado?

62. (Unicamp-SP) O esquema a seguir representa a seqüência de reações que levam à formação do pigmento da pelagem de uma espécie animal. Os genes autossômicos A, B e C são responsáveis pela produção das enzimas A, B e C que atuam nesse processo metabólico. Mutações nos genes A, B e C produzem respectivamente os alelos recessivos a, b e c.

a) Do ponto de vista genético, quantos tipos de albinismo podem ocorrer nessa espécie? Por quê?
b) Demonstre o fenótipo esperado de um cruzamento entre animais de linhagens puras com dois tipos diferentes de albinismo.
c) É possível ocorrer uma mutação em um gene sem que se altere a enzima correspondente? Justifique.

CAPÍTULO

8 APLICAÇÕES DO CONHECIMENTO GENÉTICO

▶ Gel de eletroforese utilizado para separar fragmentos de DNA, que aparecem como faixas quando iluminados por ultravioleta.

8.1 Melhoramento genético

Os conhecimentos biológicos têm afetado cada vez mais a vida das pessoas, seja pelas possibilidades de sua aplicação nos campos da produção de alimentos e da saúde, seja pelos conflitos morais e éticos decorrentes dessa aplicação. Devemos ou não cultivar plantas transgênicas? Por um lado, elas podem ajudar a combater a fome; por outro, podem causar impactos ambientais imprevisíveis. Devemos ou não realizar exames pré-natais para detectar doenças genéticas? De que adianta essa detecção se a legislação brasileira continuar a proibir o aborto terapêutico? Deve ou não ser permitido que companhias de seguro-saúde solicitem exames genéticos para conhecer predisposições a doenças de seus segurados? Deve ou não ser permitida a realização de exames de DNA para identificação de paternidade, sem requisição judicial ou consentimento explícito do envolvido, quando este for maior de idade? Deve ou não ser permitido que empregadores solicitem exames genéticos como critério de seleção para contratos de trabalho?

Essas são apenas algumas das questões que os avanços científicos na área da Genética têm gerado nos últimos anos, e para as quais ainda não há consenso ou decisões de ordem moral, ética ou legal. Neste capítulo discutiremos alguns dos avanços do conhecimento genético, que também ocasionaram alguns conflitos com os quais a sociedade se defronta atualmente.

Produção de novas variedades

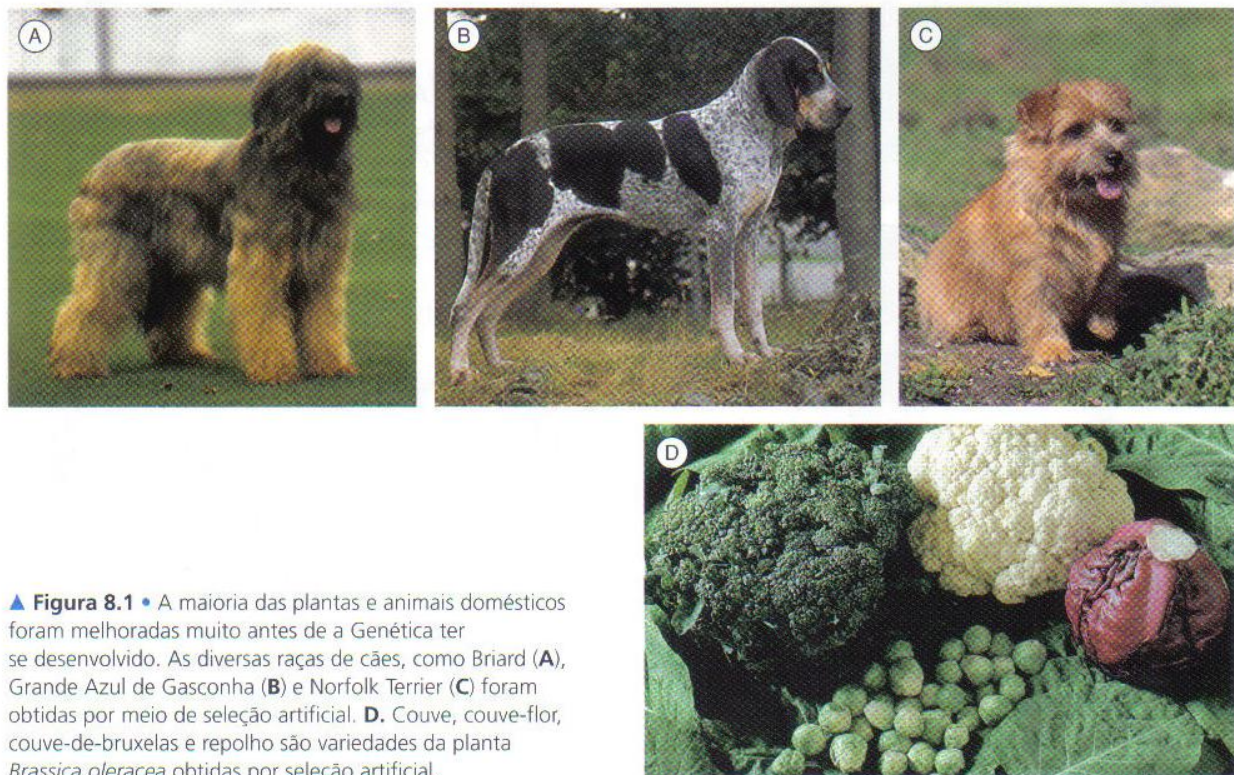
O conhecimento sobre hereditariedade tem gerado tecnologias de grande utilidade para a humanidade, desde a Pré-história. As espécies de plantas, de animais e de microrganismos que constituem nossos alimentos básicos foram domesticadas e "melhoradas" em diferentes regiões do mundo, há milhares de anos, muito antes da descoberta dos mecanismos da herança biológica (veja Tabela 1.1, no capítulo 1).

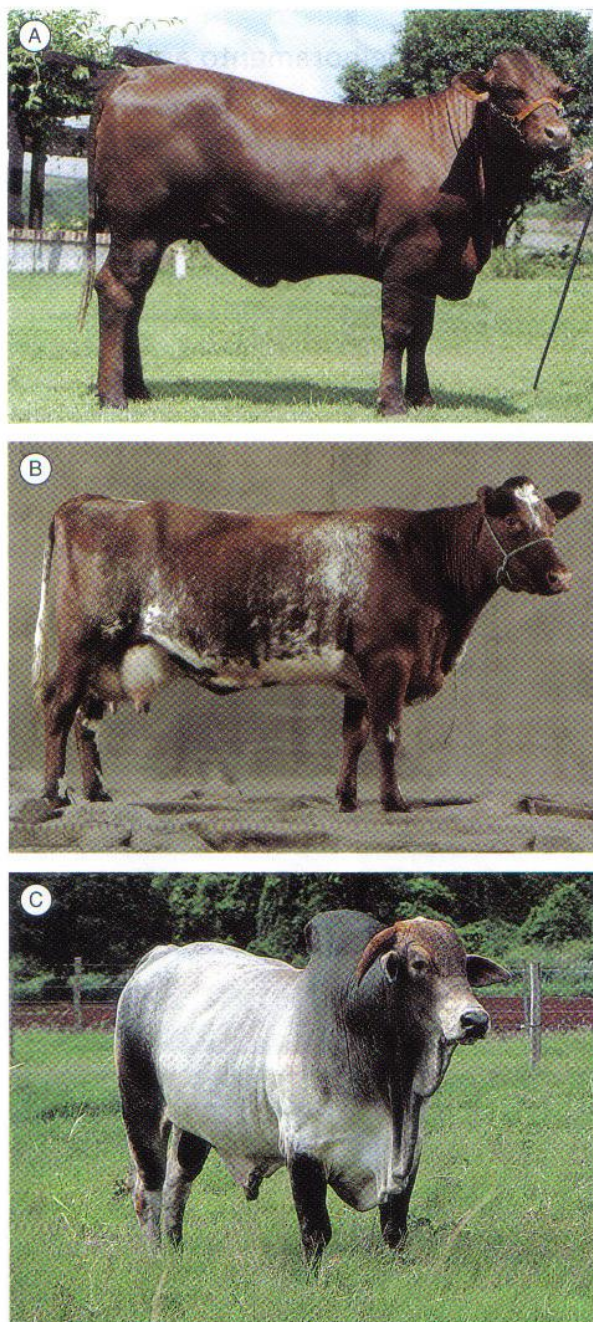
O **melhoramento** consiste em selecionar e aprimorar as qualidades das espécies tendo em vista sua utilização pelos seres humanos. Inicialmente, isso era feito de forma intuitiva. Quando um agricultor desejava obter espigas de milho com maior número de grãos, por exemplo, ele escolhia, isto é, selecionava para plantar, apenas sementes de espigas com grande número de grãos. Se desejava aumentar o peso médio das galinhas, selecionava os galos e as galinhas maiores e mais pesados como reprodutores. Com o desenvolvimento de novos conceitos e novas técnicas genéticas tornou-se possível racionalizar e aperfeiçoar a seleção. O melhoramento das espécies em função de sua utilidade tornou-se científico. **(Fig. 8.1)**

Atualmente a humanidade beneficia-se de várias técnicas de seleção genética. Grande parte dos alimentos que consumimos, como vegetais, carnes, laticínios etc., foi produzida com o emprego de técnicas de melhoramento. Uma importante contribuição da Genética para a agricultura e a pecuária foi mostrar que quase todas as qualidades de valor econômico, como a fertilidade de animais e plantas, o tamanho e o peso dos grãos, a produção de carne, de leite e de ovos, a capacidade de resistir a doenças etc., são condicionadas por genes que interagem fortemente com fatores ambientais. Esse conhecimento tornou possível desenvolver técnicas mais eficientes de seleção e de melhoramento em características de importância econômica.

Exemplo de melhoramento animal

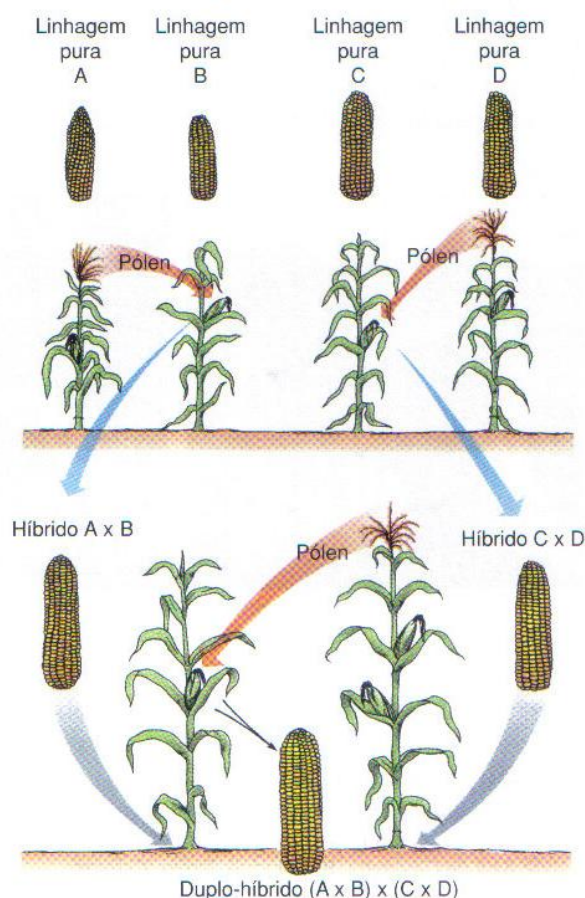
A produção de uma nova raça de gado bovino, conhecida como **gado Santa Gertrudes**, é um exemplo de como se podem desenvolver novas variedades de animais pela combinação de características de diferentes raças.

O gado da raça *Shorthorn*, criado em certas regiões dos Estados Unidos, é um excelente produtor de carne, mas sensível a doenças transmitidas por insetos e carrapatos; além disso, é pouco resistente ao calor, sofrendo muito no verão. Com o objetivo de obter uma variedade resistente a infecções e ao calor, mas que fosse também boa produtora de carne, os criadores cruzaram o gado *Shorthorn* com o gado Zebu, raça de origem indiana muito resistente a parasitas e ao calor, mas que produz relativamente menos carne.

▲ **Figura 8.1** • A maioria das plantas e animais domésticos foram melhoradas muito antes de a Genética ter se desenvolvido. As diversas raças de cães, como Briard (**A**), Grande Azul de Gasconha (**B**) e Norfolk Terrier (**C**) foram obtidas por meio de seleção artificial. **D.** Couve, couve-flor, couve-de-bruxelas e repolho são variedades da planta *Brassica oleracea* obtidas por seleção artificial.

Após vários ciclos de cruzamento entre os gados *Shorthorn* e Zebu, sempre selecionando as características desejadas, desenvolveu-se uma população homogênea, que foi considerada uma nova raça, denominada Santa Gertrudes. Além da ótima produção de carne, o gado Santa Gertrudes tem boa resistência a doenças infecciosas e grande tolerância ao calor, podendo viver em regiões onde o gado *Shorthorn* não sobreviveria bem. **(Fig. 8.2)**

▲ **Figura 8.2** • O gado Santa Gertrudes (**A**) é uma raça desenvolvida por seleção a partir de cruzamentos entre as raças *Shorthorn* (**B**) e Zebu (**C**).

Heterose ou vigor híbrido

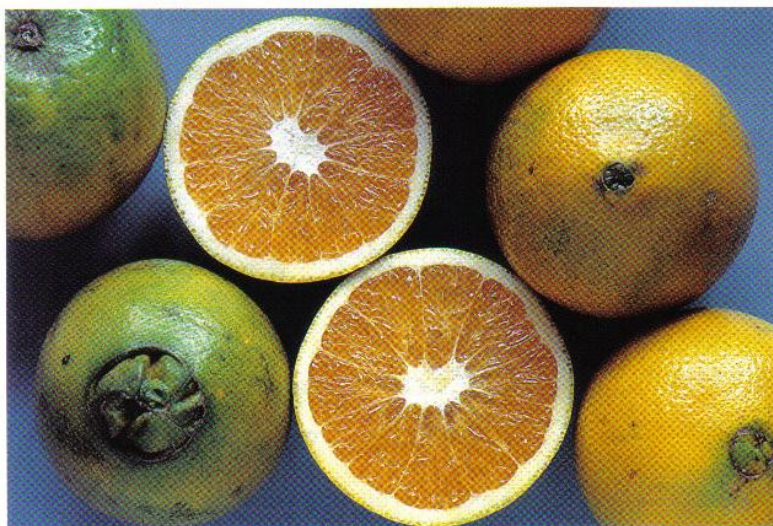
Em 1909, o geneticista norte-americano George H. Shull (1874-1954) descobriu que o cruzamento de duas determinadas variedades de milho produzia plantas mais vigorosas, mais resistentes a doenças e com espigas maiores e mais uniformes que as das variedades parentais. Essas plantas foram denominadas **híbridas**, termo utilizado também para designar o produto do cruzamento entre linhagens diferentes de uma mesma espécie. Os cientistas concluíram que, no caso do milho, as plantas híbridas eram superiores às linhagens puras por possuírem muitos genes em condição heterozigótica, em contraste com as linhagens puras altamente homozigóticas. Esse fenômeno ficou conhecido como **vigor híbrido**, ou **heterose**.

O conhecimento da base genética do vigor híbrido no milho permitiu a produção de "híbridos-duplos", isto é, obtidos a partir de quatro linhagens homozigóticas parentais. Esse tipo de cruzamento teve tanto sucesso que hoje a maior parte todo o milho que se planta no mundo é híbrido. O fenômeno da heterose não se restringe ao milho, sendo utilizado também em outras plantas como o morango, o tomate, o algodão e a cebola, e em espécies animais, entre elas a galinha doméstica. **(Fig. 8.3)**

▲ **Figura 8.3** • Representação dos cruzamentos utilizados na obtenção do milho híbrido.

QUADRO 8.1 • Origem e propagação da laranja-da-baía

A **laranja-da-baía**, ou **laranja-baía**, facilmente reconhecida pela presença de um "umbigo" saliente em um dos pólos, é uma variedade triplóide (*3n*), isto é, apresenta três lotes cromossômicos. Sua meiose é anormal, não produzindo gametas nem sementes. A laranja-da-baía surgiu espontaneamente no estado da Bahia em 1810, por um processo conhecido como mutação cromossômica (ver no capítulo 10 deste volume) e, desde então, é propagada assexuadamente. Ramos da árvore original foram enxertados em caules de outras variedades de plantas cítricas e assim suas qualidades puderam ser mantidas. **(Fig. 8.4)**

Em 1870, um missionário presbiteriano norte-americano em missão na Bahia, impressionado com a ausência de sementes e excelente sabor da laranja-da-baía, enviou doze mudas dessa variedade ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em Washington.

Em 1873, duas dessas mudas foram enviadas à Califórnia e plantadas no quintal da casa do senhor e senhora Luther C. Tibbets. Eles forneceram mudas das laranjeiras aos vizinhos, e, logo depois, muitas fazendas da Califórnia já estavam produzindo a laranja-da-baía. Hoje, as plantas descendentes das duas laranjeiras plantadas em 1873 pelos Tibbets, conhecidas pelo nome de *Washington Navel*, cobrem mais de 100 mil acres da Califórnia, totalizando dezenas de milhões de árvores.

◄ **Figura 8.4** • A laranja-da-baía é uma variedade triplóide e estéril, economicamente importante. Sua propagação é feita assexuadamente por meio de enxertia.

Propagação de variedades úteis

Em um programa de melhoramento, além de obter determinado fenótipo desejado, é necessário propagar o genótipo que o condiciona. No caso das plantas, o modo mais simples de propagação de um genótipo é pela reprodução assexuada. Nesse caso, as plantas-filhas são idênticas à planta-mãe, mantendo todas as características desejadas.

Uma maneira de propagar assexuadamente variedades de plantas de interesse é a **enxertia** (de enxertar, do latim *insertare*, inserir, introduzir), que consiste em implantar parte de uma planta viva em outra. Essa técnica tem sido muito empregada na disseminação de plantas frutíferas, como laranjas, uvas, abacates, maçãs etc. (relembre a reprodução assexuada em angiospermas no capítulo 6 do volume 2 desta coleção).

Propagação de plantas por cultura de tecidos

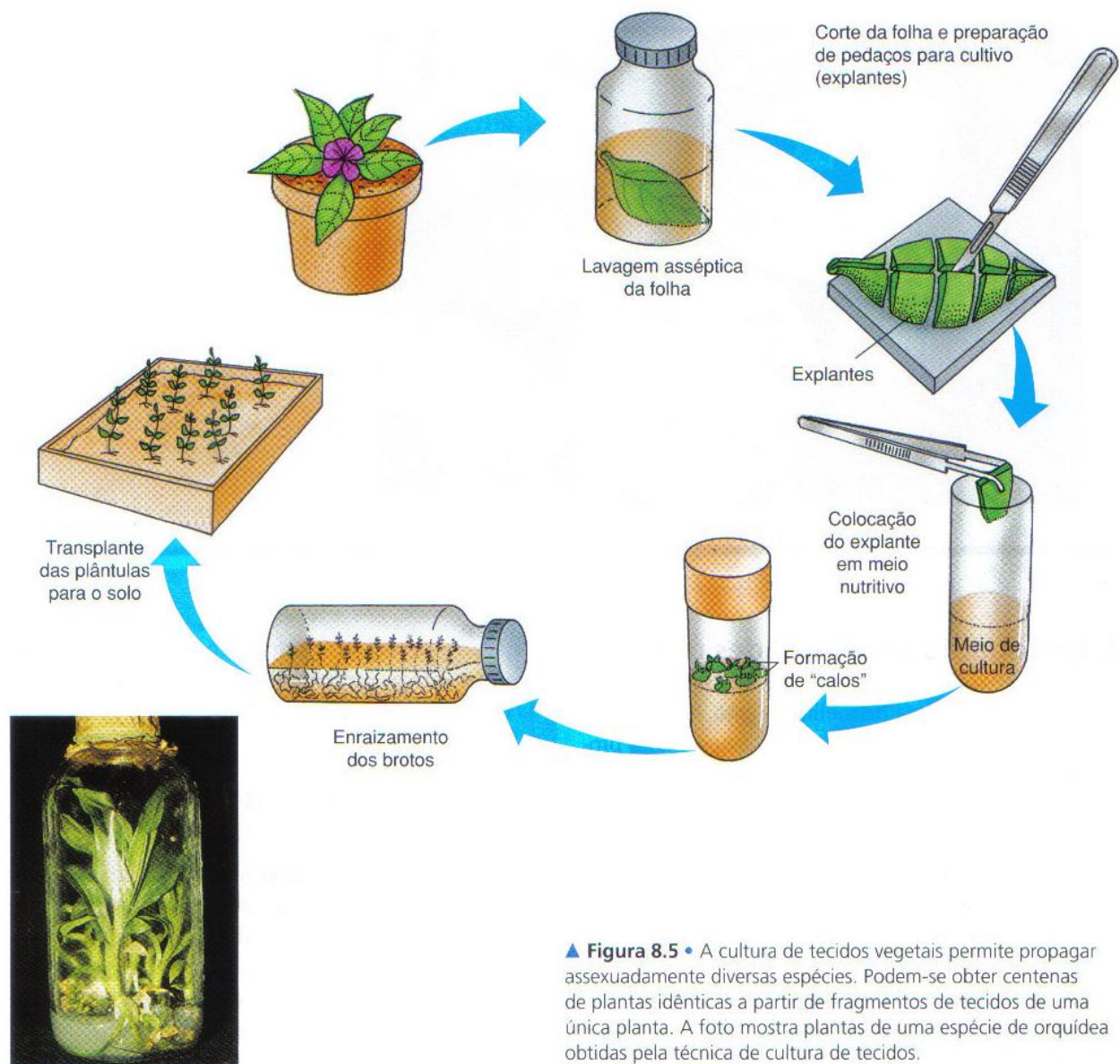
A **cultura de tecidos** vegetais consiste em retirar uma pequena porção de tecido vivo de uma planta e cultivá-la em um meio nutritivo, suplementado por hormônios e fatores de crescimento. Nessas condições, certas células vegetais retomam a capacidade de se dividir e podem originar uma planta completa, geneticamente idêntica à planta-mãe.

Essa técnica tem sido empregada na produção, em larga escala, de plantas como orquídeas e violetas. A vantagem é que se podem produzir milhares de plantas idênticas, a partir da cultura de células de uma única planta. **(Fig. 8.5)**

Endogamia e eliminação de heterozigóticos

Do ponto de vista do melhoramento genético, os processos sexuais das plantas e dos animais domésticos complicam a propagação das variedades melhoradas. A segregação e a recombinação genética produzem, a cada geração, novas misturas de alelos, o que torna difícil a propagação inalterada dos genótipos desejados. Uma maneira de superar, em parte, esse problema é promover a **autofecundação**, o que ocorre facilmente em plantas monóicas (hermafroditas). Apesar de não impedir a recombinação, a autofecundação garante, pelo menos, que o indivíduo filho não receba alelos "estranhos" à linhagem. Nos animais e nas plantas dióicas, os descendentes de uns poucos indivíduos escolhidos são cruzados entre si por várias gerações, o que se denomina **endogamia** (do grego *endos*, dentro, e *gamos*, casamento).

A descendência que resulta da endogamia é mais homogênea do que a proveniente de cruzamentos livres. Os filhos dos cruzamentos endogâmicos tendem a ser mais semelhantes aos pais e a apresentar maior número de genes na condição homozigótica. Dessa forma, um determinado genótipo de interesse pode ser propagado por reprodução sexuada com relativamente pouca modificação ao longo das gerações.

▲ **Figura 8.5** • A cultura de tecidos vegetais permite propagar assexuadamente diversas espécies. Podem-se obter centenas de plantas idênticas a partir de fragmentos de tecidos de uma única planta. A foto mostra plantas de uma espécie de orquídea obtidas pela técnica de cultura de tecidos.

As **raças puras**, das quais muito se ouve falar, são linhagens altamente homozigóticas que produzem indivíduos com mesmas características fenotípicas, geração após geração. Os indivíduos dessas raças são semelhantes entre si porque possuem genótipos semelhantes, homozigóticos para muitos de seus genes. **(Fig. 8.6)**

▲ **Figura 8.6** • As raças de cães, como estes Dachmund, são mantidas por meio de cruzamentos intra-raciais altamente selecionados. A exigência de "pedigrees" pelas associações de criadores define que características da raça devem ser mantidas.

Problemas decorrentes do melhoramento

Um dos problemas decorrentes do melhoramento é o surgimento de linhagens com pouca **variabilidade genética**, isto é, com pouca diferença genética entre os indivíduos, o que reduz a capacidade da população em se adaptar eficientemente a alterações ambientais. Os antigos agricultores, mesmo antes do desenvolvimento da Genética, já lidavam com esse problema. Em campos de trigo, era comum plantar diversas variedades, o que aumentava a chance de se preservar ao menos parte da lavoura em caso de seca, enchente ou pragas. Essa técnica milenar tem sido negligenciada e, hoje, predominam as lavouras de monocultura, em que grandes áreas são ocupadas com uma única variedade de planta. Apesar de as monoculturas produzirem maiores lucros em curto prazo, há o risco de uma praga dizimar completamente uma plantação inteira, sem encontrar indivíduos geneticamente resistentes, uma vez que todas as plantas são geneticamente semelhantes. **(Fig. 8.7)**

Um exemplo histórico de um desastre envolvendo a perda de uma monocultura ocorreu em meados do século XIX, na Irlanda, onde a produção de batata, um dos principais alimentos da população na época, baseava-se em uma única variedade. Uma doença causada por fungos dizimou, em curtíssimo prazo, praticamente todas as plantações de batata da Irlanda. O resultado foi catastrófico: morte de milhões de pessoas em decorrência da fome.

Em 1970, uma doença causada por um fungo atacou as culturas de milho híbrido do sul dos Estados Unidos, reduzindo à metade a safra prevista. Estudos realizados pelo governo americano mostraram que as culturas de milho norte-americano eram geneticamente uniformes e muito vulneráveis a doenças. Essas culturas foram recuperadas com a introdução de um alelo para resistência ao fungo, obtido em uma variedade de milho nativa da Colômbia.

▲ **Figura 8.7** • Na agricultura moderna predominam as monoculturas, isto é, vastas áreas plantadas com uma única variedade de planta. **A.** Plantação de soja. **B.** Plantação de milho.

8.2 Aconselhamento genético e prevenção de doenças hereditárias

Aconselhamento genético

Diversas doenças humanas são hereditárias. O estudo dos genótipos de um casal e de seus parentes permite, em certos casos, estimar a chance de uma criança ser afetada por uma doença já manifestada em alguns membros da família. Pelo estudo dos heredogramas, especialistas no campo da Genética Humana podem orientar um casal sobre os riscos de virem a ter filhos com alguma doença hereditária; esse tipo de orientação constitui o **aconselhamento genético**.

Um casal só deve se preocupar em procurar aconselhamento genético se já teve alguma criança com problemas ou se tiver parentes próximos afetados por doenças genéticas. Mulheres com mais de 35 anos que desejam engravidar devem procurar um serviço de aconselhamento genético, pois o risco de gerar filhos com número anormal de cromossomos aumenta significativamente depois dessa idade (recorde o item Não-disjunção cromossômica no capítulo 8 do volume 1 desta coleção).

Identificação de portadores de alelos deletérios

Alelos que causam doenças, ou que diminuem a taxa de sobrevivência ou de reprodução de um organismo, são genericamente chamados de **alelos deletérios**. Muitos alelos deletérios presentes nas populações humanas surgem por mutações de alelos normais, comportando-se como recessivos. Para calcular o risco de uma doença genética recessiva se manifestar, os geneticistas tentam descobrir se os pais são ou não portadores do alelo para a doença. A maioria das crianças com problemas causados por alelos recessivos tem pais normais. Todas as pessoas têm pelo menos alguns alelos deletérios, os quais só não se manifestam porque estão em dose simples, isto é, na condição heterozigótica.

Atualmente já é possível, em relação a algumas doenças genéticas, descobrir se uma pessoa é portadora ou não de um alelo deletério recessivo em condição heterozigótica. Por exemplo, um teste bioquímico relativamente simples permite descobrir se uma pessoa normal é portadora do alelo recessivo que condiciona a doença de Tay-Sachs, uma enfermidade fatal. Pessoas heterozigóticas para anemia falciforme também podem ser identificadas em um exame de sangue simples e barato, o que ajuda a evitar o nascimento de crianças afetadas por essa enfermidade.

É cada vez maior o número de genes deletérios identificados pelas novas técnicas de análise do DNA, o que vem se constituindo em uma poderosa ferramenta de auxílio ao aconselhamento genético. Nesses casos, a partir de uma única célula de um embrião, pode-se determinar se ele terá ou não uma doença genética grave. Nos casos de fertilização *in vitro*, em que existe chance de os filhos terem herdado determinado alelo deletério, costuma-se realizar exame de DNA de uma célula dos embriões antes da implantação no útero da mãe. Dentre os embriões analisados, o especialista escolhe apenas os geneticamente saudáveis para serem implantados.

Consangüinidade

A probabilidade de alelos deletérios recessivos encontrarem-se, originando uma pessoa homozigótica doente, aumenta nos **casamentos consangüíneos**, em que as pessoas que se casam são parentes próximos, tais como primos em primeiro grau. Pessoas aparentadas, por terem herdado seus genes de ancestrais comuns, têm maior chance de possuir um mesmo tipo de alelo "familiar" que pessoas não-aparentadas.

Diversas culturas têm leis que proíbem ou desaconselham o casamento entre parentes próximos. Essas leis surgiram, provavelmente, da observação empírica de que defeitos presentes ao nascer são mais comuns nos casamentos entre parentes. Problemas causados por casamentos consangüíneos também podem ser observados nos animais domésticos e de zoológico, cuja pequena quantidade leva parentes próximos a serem cruzados entre si.

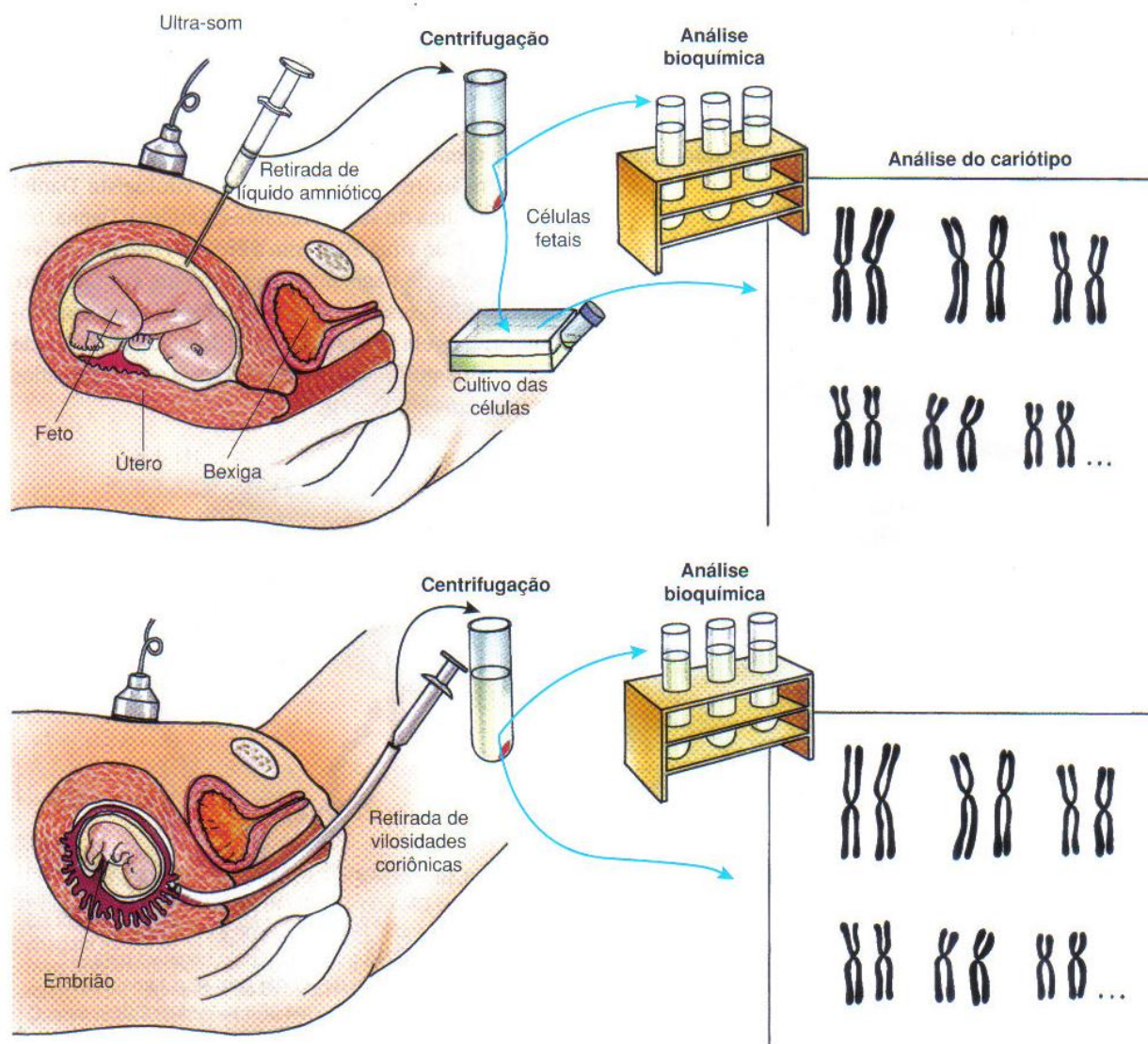
Diagnóstico pré-natal

Atualmente é possível diagnosticar certas doenças genéticas graves ainda durante a vida intra-uterina. Nesses casos, em diversos países, o casal pode optar pelo aborto terapêutico ou preparar-se para criar um filho portador da anomalia. Há dois métodos básicos para diagnosticar possíveis defeitos genéticos de um embrião em desenvolvimento: a amniocentese e a amostragem vilo-coriônica.

A **amniocentese** é uma técnica rápida, precisa e de pouco risco para a mãe e para o feto, sendo empregada para análise de fetos entre a 15ª e a 18ª semanas de gravidez. Uma agulha longa é introduzida na barriga até atingir a bolsa amniótica, operação monitorada por um aparelho de ultra-sonografia. Bastam cerca de 20 mililitros de líquido amniótico para realizar diversos tipos de exame.

Certas doenças podem ser detectadas pela presença, no líquido amniótico, de determinadas substâncias. Podem-se, também, cultivar células fetais presentes no líquido amniótico, fazendo com que elas se multipliquem, o que permite estudar seus cromossomos e construir idiogramas, assim como realizar exame do DNA fetal (recorde o capítulo 7 do volume 1 desta coleção).

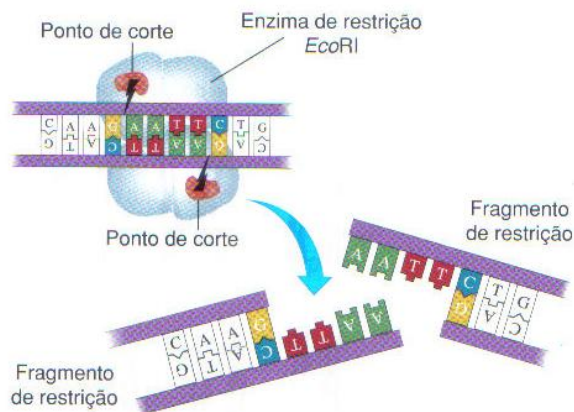
A **amostragem vilo-coriônica** permite diagnosticar doenças hereditárias entre a 8ª e a 11ª semanas de gravidez, antes, portanto, que a amniocentese. Com o auxílio de um longo instrumento de punção introduzido pela vagina até o interior do útero, retira-se uma pequena porção do envoltório embrionário, o chamado cório. As células embrionárias podem, então, ser cultivadas em meio nutritivo ou ser analisadas imediatamente, dependendo do tipo de estudo que se quer realizar. A operação de retirada de amostras de vilosidades coriônicas causa aborto do embrião em cerca de 1% dos casos. Por isso, esse tipo de diagnóstico é empregado apenas quando há alto risco de doença genética, o que pode justificar sua identificação precoce, para um eventual aborto terapêutico. **(Fig. 8.8)**

Essas técnicas diagnósticas, que possibilitam a identificação de portadores de doenças graves ainda durante a vida intra-uterina, colocam em discussão a questão do aborto terapêutico e levam a questionamentos éticos e morais. Os novos caminhos apontados pela Genética exigem que a sociedade discuta novas atitudes, normas e valores, coerentes com o conhecimento científico atual.

▲ **Figura 8.8** • Representação das técnicas utilizadas em exames pré-natais. Acima, técnica de amniocentese. Abaixo, técnica de análise vilo-coriônica.

8.3 A Genética Molecular e suas aplicações

Enzimas de restrição

No início dos anos 1970 descobriu-se que certas enzimas bacterianas, denominadas endonucleases de restrição, podiam cortar a molécula de DNA em pontos específicos, gerando fragmentos de tamanhos definidos e que podiam ser analisados.

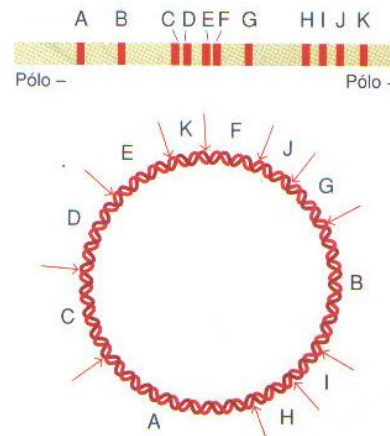
As **endonucleases de restrição** são enzimas bacterianas que atuam como "tesouras moleculares", reconhecendo seqüências de pares de bases específicas em moléculas de DNA e cortando-as nesses pontos. Elas são altamente específicas: cada tipo de enzima reconhece e corta apenas uma determinada seqüência de nucleotídios, em geral constituída por 4 ou 6 pares de bases nitrogenadas. **(Fig. 8.9)**

Nome da enzima	Bactéria de origem	Sítio de ação
Aha III	*Aphanothece halophytica*	5' – TTT AAA – 3' 3' – AAA TTT – 5'
Bam HI	*Bacillus amyloliquefaciens* H	5' – GGATCC – 3' 3' – CCTAGG – 5'
Eco RI	*Escherichia coli* RY 13	5' – GAATTC – 3' 3' – CTTAAG – 5'
Hind III	*Haemophilus influenzae* Rd	5' – AAGCTT – 3' 3' – TTCGAA – 5'
Taq I	*Thermus aquaticus* YTI	5' – TCGA – 3' 3' – AGCT – 5'

↓↑ Sítios de corte da enzima

▲ **Figura 8.9** • Representação do modo de ação da endonuclease de restrição *Eco* RI. A tabela mostra as seqüências de corte reconhecidas por algumas endonucleases de restrição, os pontos onde elas cortam essas seqüências e a linhagem de bactéria que produz cada enzima. O nome das enzimas compõe-se das iniciais do nome da espécie e, às vezes, da sigla da linhagem da bactéria que a produz.

Acredita-se que as bactérias tenham desenvolvido as enzimas de restrição ao longo de sua evolução, como proteção ao ataque de bacteriófagos. Uma molécula de DNA viral que contenha sítios para uma endonuclease bacteriana, ao ser injetada na bactéria, é prontamente cortada nesses pontos e deixa de funcionar. Hoje são conhecidas centenas dessas enzimas, que são purificadas e comercializadas por diversos laboratórios no mundo.

Além de evidenciar a existência de um novo sistema de defesa bacteriana e da complexa interação entre bactérias e seus vírus parasitas, a descoberta das enzimas de restrição permitiu grandes avanços na Genética Molecular. Por isso, os três pesquisadores responsáveis pela elucidação do mecanismo de ação das endonucleases de restrição, o suíço Werner Arber (n. 1929) e os norte-americanos Daniel Nathans (1928-1999) e Hamilton Smith (n. 1931), receberam o Prêmio Nobel em Medicina ou Fisiologia em 1978.

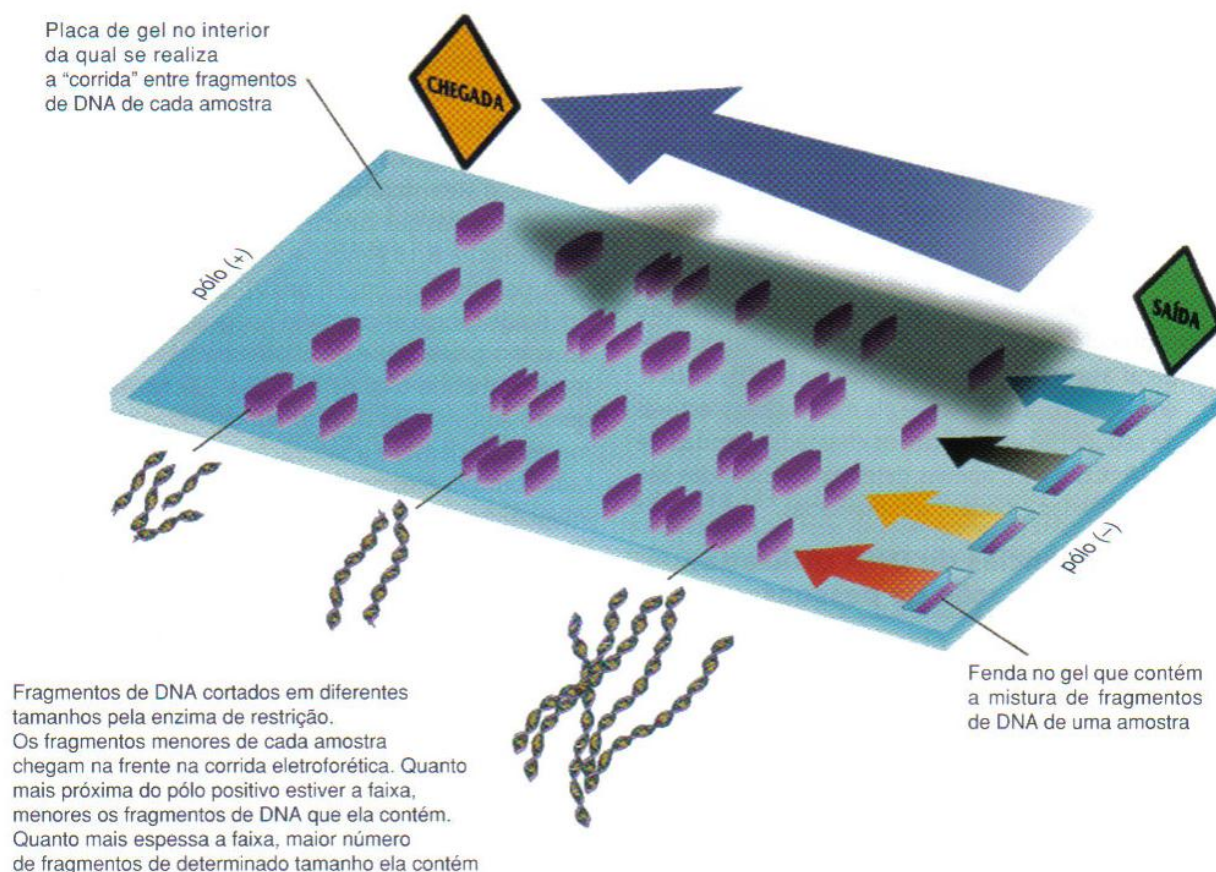
Moléculas idênticas de DNA tratadas com determinada endonuclease de restrição, são cortadas nos mesmos pontos, originando fragmentos de tamanhos idênticos. Por exemplo, no primeiro estudo com endonucleases de restrição, realizado em 1971, o virologista Daniel Nathans e uma de suas estudantes, Kathleen Danna, trataram DNA do vírus SV40 com a enzima *Hind* II e obtiveram 11 tipos de fragmentos, que diferiam em tamanho. Como o DNA desse vírus é uma molécula circular, concluiu-se que ela foi cortada em 11 locais; o tamanho de cada fragmento correspondia à distância entre dois sítios de corte adjacentes. **(Fig. 8.10)**

▲ **Figura 8.10** • Acima, separação eletroforética dos 11 fragmentos de DNA do vírus SV40 produzidos pela digestão com a enzima *Hind* II. No processo de eletroforese os fragmentos de DNA migram do pólo negativo para o positivo, separando-se de acordo com seus tamanhos: quanto menor o fragmento, maior a sua velocidade de migração. Abaixo, círculo representativo do cromossomo do vírus com os locais de corte indicados pelas setas e a localização dos 11 fragmentos gerados pela digestão enzimática.

Uma endonuclease de restrição é como uma ferramenta que permite cortar moléculas de DNA de forma controlada e reproduzível. Diversos pesquisadores passaram a utilizar a nova técnica para mapear o genoma de outros vírus, depois de bactérias e de outros organismos, lançando as bases para a Engenharia Genética e, em seguida, para o Projeto Genoma Humano.

Separação eletroforética de fragmentos de DNA

Os fragmentos de diferentes tamanhos, gerados pelo corte de um DNA com determinada endonuclease de restrição, podem ser separados uns dos outros por meio de uma técnica denominada **eletroforese** (do grego *phoresis*, ação de transportar, migração).

O processo de eletroforese é realizado em uma placa de gelatina especial (gel); a solução contendo os fragmentos de DNA é colocada em fendas em uma das extremidades do gel, à qual é conectado o pólo negativo de uma fonte geradora de corrente elétrica; ao pólo oposto do gel é ligado o pólo positivo da fonte. A aplicação de uma diferença de potencial na placa de gel faz os fragmentos de DNA se deslocarem em direção ao pólo positivo, uma vez que eles possuem carga elétrica negativa. O deslocamento dos fragmentos de DNA no gel é comparável a uma corrida de obstáculos (estes são representados pelas fibras que formam o gel); o DNA movimenta-se entre as fibras do gel e, quanto menor o tamanho dos fragmentos, maior a velocidade com que eles se deslocam.

Quando o campo elétrico é desligado, fragmentos de mesmo tamanho "estacionam" juntos em determinada posição na placa de gelatina, formando uma faixa, ou banda. A placa de gelatina é, então, tratada com uma solução de brometo de etídio ($C_{21}H_{2}OBrN_{3}$), que adere às moléculas de DNA, formando um complexo que emite luz quando iluminado com raios ultravioleta; assim, as bandas formadas pelos fragmentos de DNA podem ser visualizadas. Fotografias do gel, obtidas sob iluminação ultravioleta, permitem aos pesquisadores analisar a posição de cada banda. Pela medida da distância relativa de migração das bandas, é possível calcular o peso molecular, e conseqüentemente o tamanho, dos fragmentos de DNA que as constituem. **(Fig. 8.11)**

▲ **Figura 8.11** • A técnica de eletroforese permite separar pedaços de DNA cortados por uma enzima de restrição. Cada tipo de DNA analisado produz um padrão de faixas característico.

QUADRO 8.2 • Identificação de pessoas pelo DNA

A análise do padrão eletroforético de fragmentos de DNA, originados pelo corte com enzimas de restrição, é hoje o método mais seguro para identificar pessoas, sendo largamente utilizado em investigações policiais e em processos judiciais.

A comprovação de que era possível caracterizar moléculas de DNA por meio do padrão de fragmentos gerados pela digestão com endonucleases de restrição levou a se pensar no emprego dessa metodologia para identificar pessoas. O raciocínio foi o seguinte: como as pessoas diferem entre si quanto ao material genético que possuem (com exceção dos gêmeos univitelínicos), a digestão do DNA de uma pessoa com uma endonuclease de restrição produzirá um padrão de fragmentos típico dela, comparável a um "código de barras" ou uma "impressão digital" molecular.

Detecção de fragmentos específicos de DNA

Nos organismos eucarióticos, o corte do DNA total do genoma por uma endonuclease de restrição produz tantos fragmentos, de tantos tamanhos diferentes, que é impossível visualizar bandas individuais na separação eletroforética: elas estão tão próximas umas das outras que aparecem como uma banda contínua ao longo do gel. Por isso, é necessário utilizar técnicas especiais para evidenciar apenas certos tipos de fragmentos.

Uma dessas técnicas, chamada **hibridização molecular**, consiste em tratar o gel de modo a separar as cadeias duplas dos fragmentos de DNA e, em seguida, colocar sobre ele moléculas detectoras de seqüências específicas, as chamadas **sondas de DNA**. Com isso, apenas determinadas bandas são evidenciadas e podem ser analisadas.

As seqüências de DNA utilizadas na identificação de pessoas

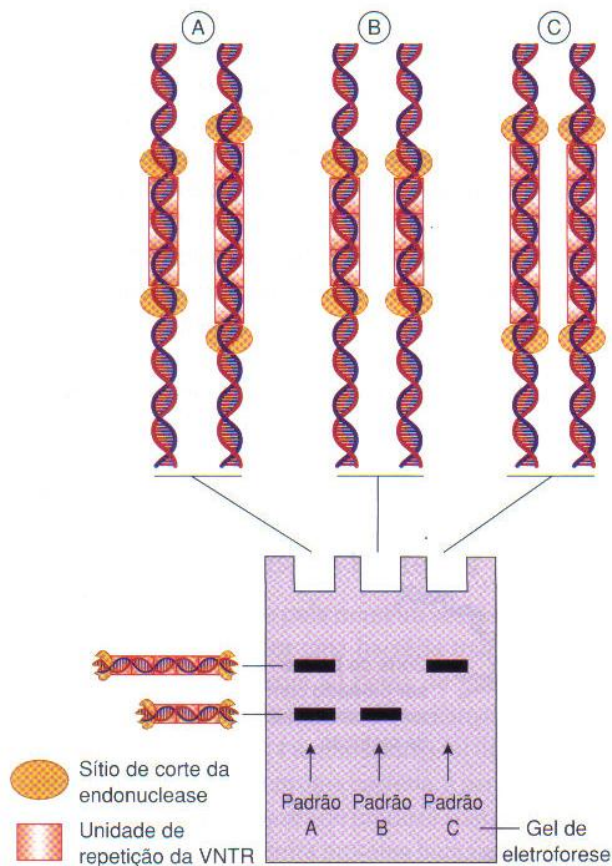
Os testes de identificação de pessoas pelo DNA utilizam sondas capazes de detectar trechos do DNA humano que variam muito entre as pessoas de uma população. Essas regiões, conhecidas pela sigla **VNTR**, iniciais da expressão inglesa ***v**ariable **n**umber of **t**andem **r**epeats* (número variável de repetições em seqüência), são constituídas por seqüências curtas, de até algumas dezenas de pares de nucleotídios, que se repetem ao longo de trechos da molécula de DNA. É o número dessas repetições que varia entre as pessoas, daí esses trechos do DNA serem chamados de VNTRs.

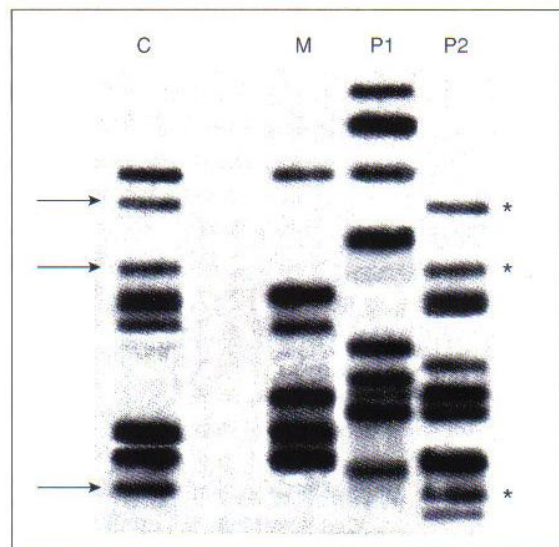
Suponha, por exemplo, que uma pessoa possua, em determinada região de um de seus cromossomos, um trecho VNTR com cinco repetições e no cromossomo homólogo, na região correspondente, um trecho com apenas três repetições. Ao ser cortado com uma enzima de restrição que atua sobre seqüências que delimitam essas VNTRs, o DNA dessa pessoa produzirá fragmentos menores, correspondentes ao trecho com três repetições, e fragmentos maiores, correspondentes ao trecho com cinco repetições. Uma sonda que identifique essas VNTRs revelará, na separação eletroforética do DNA, duas bandas de tamanhos diferentes. Uma outra pessoa que possua em ambos os cromossomos VNTRs com três repetições, com a utilização da mesma sonda, apresentará apenas uma banda. Uma terceira pessoa com cinco repetições em cada cromossomo também apresentará uma única banda, porém localizada mais próximo do pólo negativo, pois terá se deslocado menos durante a eletroforese devido ao seu maior tamanho. **(Fig 8.12)**

Em certos casos, um mesmo tipo de unidade de repetição está presente em diversas regiões do genoma, formando VNTRs de diversos tamanhos. Assim, quando se utiliza uma sonda capaz de revelar a seqüência de bases dessas VNTRs, obtêm-se diversas bandas na separação eletroforética. É a combinação dos diversos tipos de bandas que caracteriza cada pessoa. Por exemplo, na figura 8.13 é mostrado o padrão de bandas do DNA da vítima de um crime (V), do DNA extraído de um fio de cabelo encontrado no local do crime, tomado como prova (P), e dos DNAs de três suspeitos de terem cometido o crime (S1, S2 e S3). Nesse caso, as quatro amostras de DNA foram digeridas com a mesma endonuclease, e a separação eletroforética foi tratada com um mesmo tipo de DNA sonda, obtendo a imagem mostrada na foto. Observe que o padrão de VNTRs da prova é idêntico ao do suspeito 3 (S3), indicando que o fio de cabelo pertencia a ele. **(Fig. 8.13)**

Determinação de paternidade pela análise do DNA

O exemplo anterior mostra que o teste de identificação de pessoas pelo DNA tem implicações éticas profundas: seu resultado pode ser fundamental na decisão de um julgamento ou na definição da paternidade de uma criança. O teste de paternidade foi um dos principais fatores de popularização da sigla DNA, mas hoje já se questiona se esse tipo de exame deve ser realizado livremente pelas pessoas. Em alguns países,

→

▲ **Figura 8.12** • Representação da detecção de VNTRs com diferentes quantidades de unidades de repetição em três pessoas. A pessoa A é heterozigótica quanto a VNTR, apresentando em um dos cromossomos 3 unidades de repetição e no cromossomo homólogo, 5 unidades. A pessoa B é homozigótica, apresentando em ambos os cromossomos homólogos 3 unidades de repetição. A pessoa C, também homozigótica apresenta 5 unidades de repetição em cada um dos cromossomos do par de homólogos. Abaixo, representação da separação eletroforética dos fragmentos de DNA das três pessoas, gerados pela digestão com uma endonuclease cujos sítios de corte franqueiam a VNTR.

▲ **Figura 8.13** • Padrões de VNTRs de quatro pessoas envolvidas em uma investigação policial e de uma prova encontrada no local do crime: (V) vítima; (P) prova; (S1, S2 e S3) suspeitos.

▲ **Figura 8.14** • Padrões de VNTRs de quatro pessoas envolvidas em um teste de paternidade: (C) criança; (M) mãe da criança; (P1 e P2) suspeitos de serem o pai.

a realização de tais exames sem solicitação explícita da justiça está sendo proibida com a justificativa de que os danos psicológicos que os resultados de tais testes podem gerar aos envolvidos superam, em muitos casos, os benefícios que eles possam trazer.

A figura 8.14 mostra o resultado de um teste de DNA de uma mulher (C), mãe de uma criança (M) cuja paternidade é disputada por dois homens (P1 e P2). Amostras de DNA dos quatro envolvidos foram tratadas com uma mesma enzima de restrição, submetidas à eletroforese em uma mesma placa de gel e tratadas com uma sonda para revelar um certo tipo de VNTR, o que resultou nos padrões de faixas mostrados na fotografia. **(Fig. 8.14)**

Note que diversos fragmentos de DNA da criança (assinalados com as setas à esquerda) não estão presentes no DNA de sua mãe e, portanto, só podem ter vindo do pai. Apenas um dos homens (P2) apresenta esses fragmentos (assinalados com asteriscos à direita), o que indica ser ele o pai da criança. Com base na estimativa da freqüência de cada tipo de VNTR na população e do número utilizado em diagnóstico (três, em nosso exemplo), pode-se estimar o grau de confiabilidade do teste, em geral bastante alto, ultrapassando os 99,9%.

Clonagem molecular do DNA

A clonagem molecular

Em 1972, os pesquisadores norte-americanos Stanley Cohen[1] (n. 1922) e Herbert Boyer (n. 1936) encontram-se em um congresso científico no Havaí. Cohen trabalhava com plasmídios bacterianos, tentando isolar genes para resistência a antibióticos, e Boyer trabalhava com enzimas de restrição. Em conversa após as conferências eles resolveram tentar algo totalmente novo: cortar DNA de plasmídios, emendá-lo a um outro DNA e introduzir a molécula produzida — um **DNA recombinante** — em bactérias. O objetivo era verificar se a molécula produzida em um tubo de ensaio era capaz de multiplicar-se na bactéria e gerar cópias idênticas a si.

A partir dessa idéia, Boyer e Cohen desenvolveram uma das mais revolucionárias metodologias para multiplicar segmentos selecionados de DNA, que levou à produção de diversas proteínas humanas de interesse médico, como o hormônio de crescimento, a insulina, o fator VIII de coagulação sangüínea, entre outras.

O plasmídio recombinante, produzido pela união do DNA plasmidial ao segmento de DNA selecionado, multiplica-se juntamente com a bactéria hospedeira. A partir de uma única célula bacteriana transformada, que recebeu o plasmídio recombinante, obtêm-se bilhões de bactérias idênticas, cada uma com uma ou mais cópias do DNA recombinante. O conjunto de moléculas de DNA idênticas, obtidas da multiplicação da célula bacteriana transformada, constitui um clone molecular, daí a metodologia para obtê-lo ser denominada **clonagem molecular**. **(Fig. 8.15)**

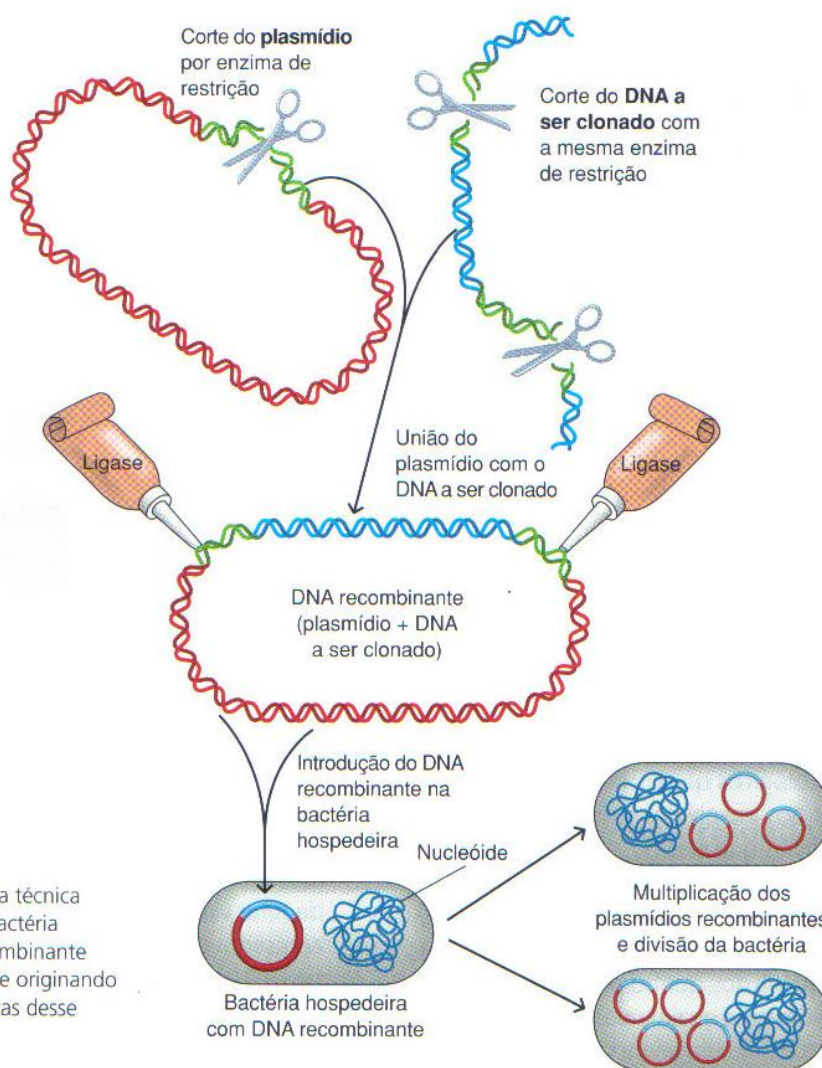



Figura 8.15 • Esquema da técnica de clonagem molecular. A bactéria hospedeira com o DNA recombinante nela introduzido multiplica-se originando um clone com cópias idênticas desse DNA.

[1]Em 1986, Stanley Cohen recebeu o Prêmio Nobel em Medicina ou Fisiologia pela descoberta do modo de ação de um fator de crescimento celular, e não pela clonagem molecular.

Os pesquisadores imaginaram que genes codificadores de proteínas humanas de interesse poderiam funcionar nas bactérias hospedeiras, produzindo proteínas tipicamente humanas. Essa possibilidade de aplicação comercial da tecnologia fez com que Boyer e Cohen patenteassem a invenção e passassem a receber dividendos (*royalties*) dos laboratórios comerciais que pretendiam utilizar a técnica de engenharia genética na fabricação de seus produtos. Após ter fornecido 350 licenças para utilização comercial da tecnologia e recebido cerca de 27 milhões de dólares em *royalties*, Cohen declarou: "Boyer e eu não trabalhamos com o objetivo de inventar a engenharia genética. Ela surgiu devido aos nossos esforços em compreender fenômenos biológicos básicos e ao concluir que nossa descoberta tinha aplicações práticas importantes".

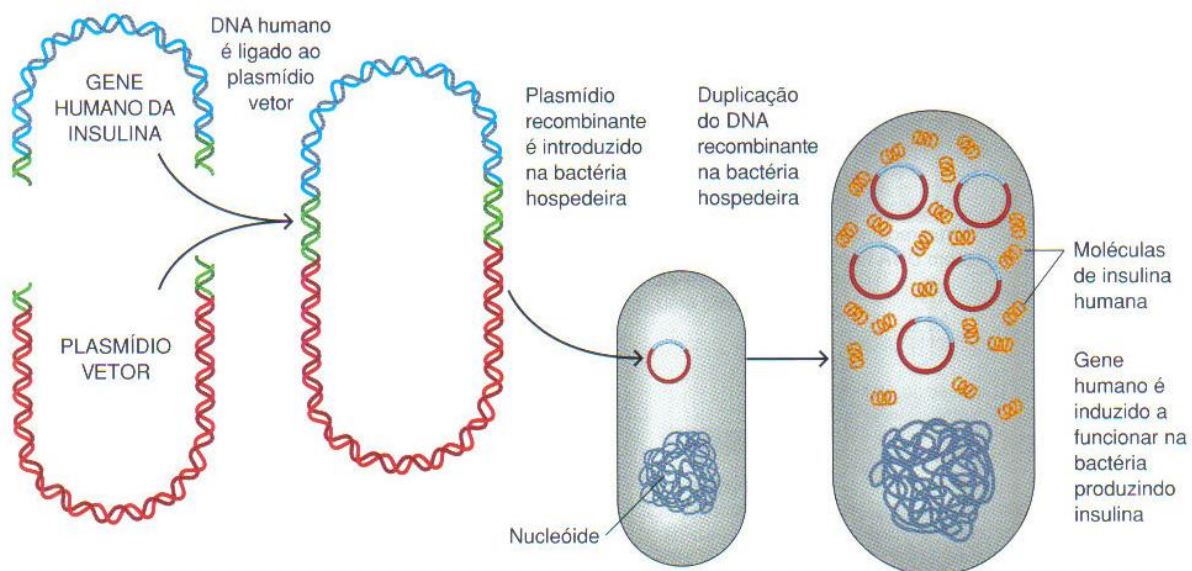
Expressão de genes em bactérias

Em 1977, obteve-se pela primeira vez a síntese de uma proteína humana por uma bactéria transformada. Um segmento de DNA com 60 pares de nucleotídios, contendo o código para a síntese da somatostatina (um hormônio composto de 14 aminoácidos) foi ligado a um plasmídio e introduzido em uma bactéria, a partir da qual foram obtidos clones capazes de produzir somatostatina.

A insulina foi a primeira proteína humana produzida por engenharia genética em células de bactérias e aprovada para uso em pessoas. Até então, a fonte desse hormônio para tratamento de diabéticos eram os pâncreas de bois e de porcos, obtidos em matadouros. Apesar de a insulina desses animais ser muito semelhante à humana, ela causa problemas alérgicos em algumas pessoas diabéticas que utilizam o medicamento. A insulina produzida em bactérias transformadas, por outro lado, é idêntica à do pâncreas humano e não causa alergia, devendo substituir definitivamente a insulina animal. **(Fig. 8.16)**

O hormônio de crescimento humano, a somatotrofina, foi produzido pela primeira vez em bactérias em 1979, mas a versão comercial só foi liberada em 1985, após ter sido submetida a inúmeros testes que mostraram sua eficiência. O hormônio de crescimento é produzido pela hipófise; na sua ausência ou em quantidade muito baixa, a criança não se desenvolve adequadamente. Até pouco tempo atrás, a única opção para crianças que nasciam com deficiência hipofisária da somatotrofina era o tratamento com hormônio extraído da hipófise de cadáveres. Agora esse hormônio é produzido por técnicas de engenharia genética.

Clonagem molecular em vírus

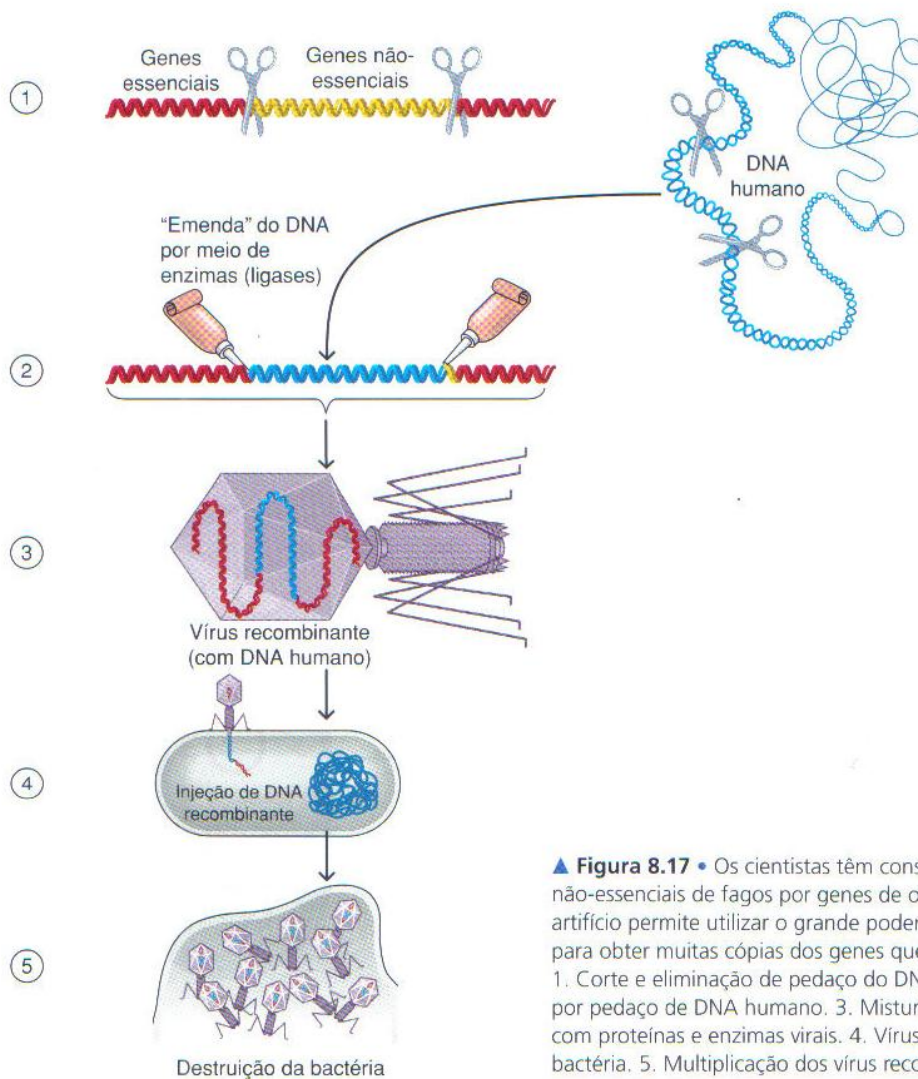
Outra maneira de clonar um segmento de DNA é introduzindo-o no cromossomo de um vírus bacteriano, que atua como **vetor de clonagem**. Dependendo dos objetivos, a clonagem em vírus tem certas vantagens sobre a clonagem em plasmídio. Em vírus, por exemplo, podem-se clonar fragmentos de DNA bem maiores que em plasmídios.

▲ **Figura 8.16** • Genes humanos ligados a DNA de plasmídios podem funcionar em bactérias, fazendo-as produzir substâncias humanas de interesse médico ou comercial.

O vírus utilizado como vetor de clonagem molecular é, em geral, o fago lambda, um dos bacteriófagos mais bem conhecidos do ponto de vista genético. Todos os genes desse fago estão mapeados em seu cromossomo, e é conhecida a seqüência exata em que cada um deles entra em atividade após o DNA viral ter sido injetado na bactéria hospedeira.

O fago lambda possui genes essenciais, indispensáveis à sua multiplicação, e genes não-essenciais, cuja presença é dispensável à reprodução viral. Os genes essenciais são responsáveis pela produção das proteínas do capsídio viral, das enzimas que atuam na duplicação do DNA viral, das enzimas de empacotamento do DNA e de algumas outras proteínas importantes; esses genes essenciais localizam-se nas extremidades do cromossomo do vírus. Os genes não-essenciais estão relacionados aos processos de recombinação entre moléculas de DNA e localizam-se na região mediana do cromossomo viral; seus produtos não interferem na multiplicação do vírus, sendo, por isso, dispensáveis.

A região mediana do cromossomo, onde se localizam os genes não-essenciais, pode ser retirada e substituída por um segmento de DNA de qualquer outro organismo. Quando o cromossomo viral se multiplica, o DNA incorporado a ele também é multiplicado. Assim, a partir de uma única partícula viral, podem-se obter bilhões de partículas idênticas, cada uma delas contendo uma cópia do fragmento de DNA que foi introduzido no cromossomo do vírus. **(Fig. 8.17)**

Cromossomos artificiais de levedura

Atualmente, podem-se clonar segmentos muito grandes de DNA em células da levedura *Saccharomyces cerevisae*. Nesse caso, o vetor é um segmento de DNA plasmidial capaz de se multiplicar em células da levedura, comportando-se como um dos cromossomos desse fungo, duplicando-se e sendo transmitido às células-filhas. Esse vetor é conhecido pela sigla *YAC* (do inglês, ***yeast artificial chromosome***, cromossomo artificial de levedura).

▲ **Figura 8.17** • Os cientistas têm conseguido substituir genes não-essenciais de fagos por genes de outros organismos. Esse artifício permite utilizar o grande poder de multiplicação do fago para obter muitas cópias dos genes que se quer estudar.
1. Corte e eliminação de pedaço do DNA viral. 2. Substituição por pedaço de DNA humano. 3. Mistura de DNA recombinante com proteínas e enzimas virais. 4. Vírus recombinante infecta bactéria. 5. Multiplicação dos vírus recombinantes.

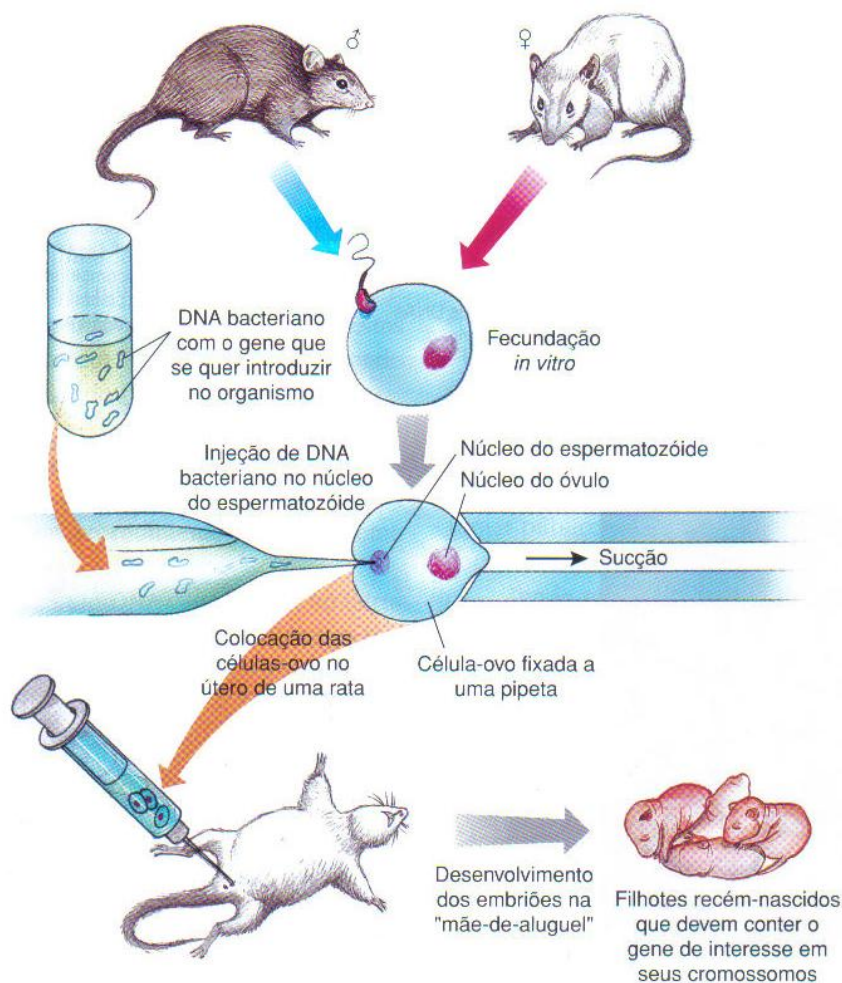
Misturando genes entre espécies: transgênicos

As técnicas da engenharia genética tornaram possível introduzir um gene humano em um camundongo, ou um gene de inseto em uma planta, por exemplo. Os organismos que recebem e incorporam genes de outra espécie são chamados de **transgênicos**.

Como são produzidos organismos transgênicos?

Animais transgênicos são produzidos pela injeção de DNA previamente clonado a partir de uma espécie em ovos de outra espécie. O DNA multiplicado por meio da clonagem é extraído do vetor, purificado e injetado, com uma microagulha, no núcleo de ovos da espécie que se deseja transformar. Se a espécie em questão for um mamífero, como um camundongo, por exemplo, é necessário fazer a fecundação *in vitro* (isto é, fora do corpo da fêmea, dentro de um recipiente de laboratório) e, posteriormente, implantar o embrião no útero de uma fêmea em período fértil. Para isso, é preciso retirar os óvulos das fêmeas, colocá-los em um líquido apropriado e adicionar espermatozóides.

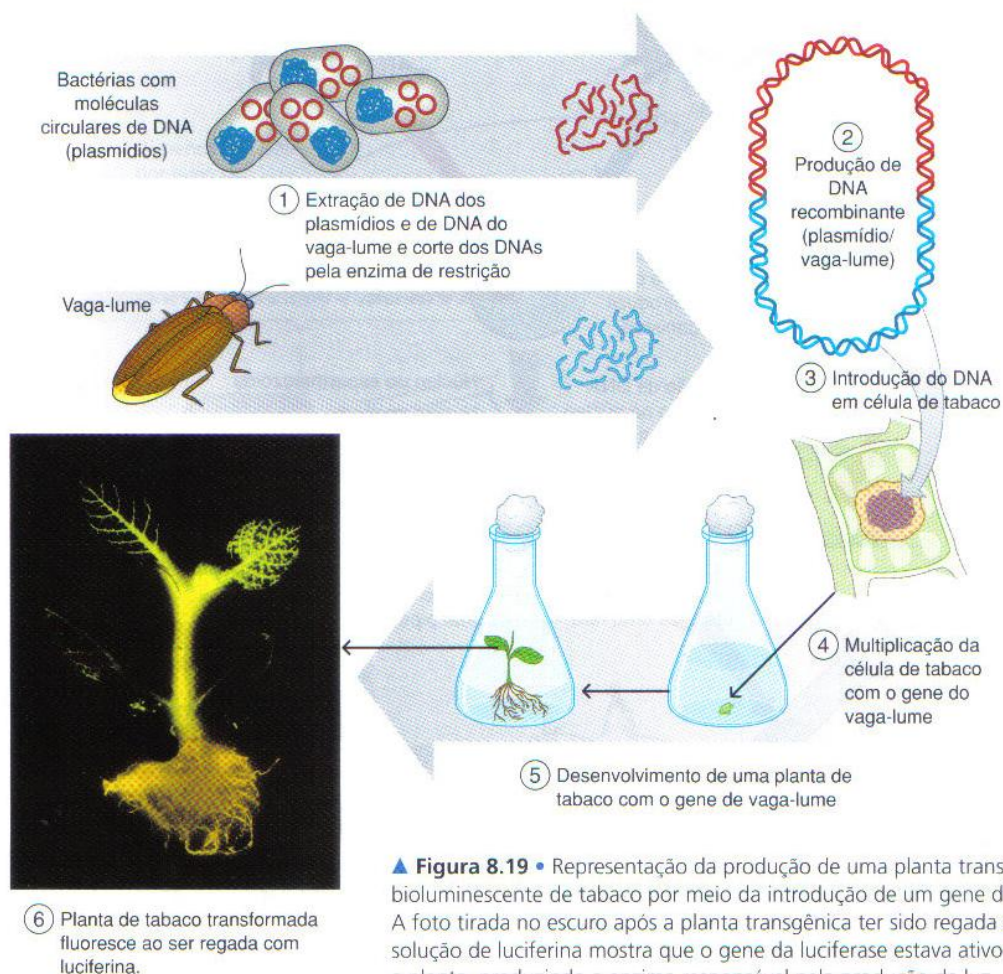
O processo da fecundação é acompanhado ao microscópio e, tão logo ocorra, o DNA clonado é injetado no ovo. A microinjeção é feita por meio de uma aparelhagem de micromanipulação, em que o DNA contido em uma finíssima agulha é injetado diretamente no núcleo do ovo. Os embriões originados desses ovos são, então, implantados no útero de uma fêmea, onde se desenvolvem.

Em geral, uma ou mais moléculas do DNA injetado incorporam-se aos cromossomos da célula-ovo, sendo transmitidas às células-filhas quando o zigoto se dividir. Assim, todas as células do indivíduo conterão esse DNA. Quando o organismo transgênico se reproduzir, os genes incorporados serão transmitidos aos descendentes, como qualquer outro gene. **(Fig. 8.18)**

▲ **Figura 8.18** • Representação das etapas de produção de um rato transgênico.

O primeiro transplante de genes bem-sucedido, em animais, foi realizado em 1981. Pedaços de DNA de coelho com o gene da hemoglobina foram injetados em ovos de camundongos; estes foram implantados no útero de fêmeas de camundongo, onde se desenvolveram. Os camundongos nascidos desses ovos tinham hemoglobina de coelho em suas hemácias. Isso mostrou que o DNA injetado no ovo se incorporou a um cromossomo e foi transmitido de célula a célula, por meio das mitoses ocorridas no desenvolvimento embrionário. Quando os camundongos transgênicos foram cruzados, o gene do coelho incorporado ao seu genoma foi transmitido de geração a geração, segundo as leis básicas da herança.

Transgênicos entre animais e plantas

A manipulação genética de plantas é mais simples que a de animais, uma vez que é relativamente fácil obter uma planta completa a partir de uma única célula geneticamente transformada. Os genes que se deseja introduzir na planta são ligados a moléculas do plasmídio *Ti* da bactéria *Agrobacterium tumefaciens*, que tem capacidade de integrar-se ao cromossomo da planta. Pode-se também introduzir DNA em células vegetais bombardeando-as com minúsculas partículas de metal com DNA aderido em sua superfície. As células que incorporam os genes são induzidas, por hormônios vegetais, a se multiplicar e originar plantas completas, que serão transgênicas.

Um exemplo bem ilustrativo de produção de planta transgênica foi a introdução de um gene de vaga-lume em uma planta de tabaco. O gene clonado era o responsável pela produção da enzima luciferase, que catalisa, no vaga-lume, a degradação da luciferina, uma reação química que libera energia na forma de luz (bioluminescência). O gene clonado em um plasmídio multiplicou-se em bactérias e, depois de purificado, foi injetado em uma célula de fumo. Por meio da técnica de cultura de tecidos vegetais, conhecida há muito tempo pelos botânicos, produziu-se uma planta inteira a partir dessa única célula transformada. O gene clonado havia se incorporado a um dos cromossomos da célula, tendo sido transmitido a todas as células da planta. Quando esta foi regada com luciferina, passou a emitir luz. **(Fig. 8.19)**

▲ **Figura 8.19** • Representação da produção de uma planta transgênica bioluminescente de tabaco por meio da introdução de um gene de vaga-lume. A foto tirada no escuro após a planta transgênica ter sido regada com uma solução de luciferina mostra que o gene da luciferase estava ativo em toda a planta, produzindo a enzima responsável pela produção de luz.

Nos últimos anos, os transgênicos de plantas tornaram-se amplamente conhecidos da população, principalmente devido às polêmicas sobre o plantio de uma variedade transgênica de soja. Essas plantas receberam um gene que confere resistência a determinados herbicidas, as substâncias utilizadas para matar as ervas daninhas que crescem nos campos cultivados. Com isso, os agricultores podem utilizar herbicidas para matar todas as outras plantas, menos a de soja transgênica; com a eliminação das plantas competidoras, aumenta a produtividade da lavoura de soja.

Outro organismo transgênico bem conhecido do público é o *milho bt*, que tem incorporado em seu genoma um gene da bactéria *Bacillus thuringensis*, que produz uma substância tóxica aos insetos, mas inofensiva aos mamíferos. Essa linhagem de milho apresenta, por isso, resistência ao ataque de insetos, tendo sido liberada para uso na alimentação do gado, mas não para uso humano.

8.4 Desvendando o genoma humano

Como vimos, hoje contamos com metodologias sofisticadas que nos permitem cortar moléculas de DNA em pedaços definidos e separá-los uns dos outros. Sabemos como induzir a multiplicação dos fragmentos isolados, para obter uma infinidade de cópias de cada um deles. Descobrimos como unir pedaços de DNA de origens diferentes, produzindo moléculas-quimeras. Estas podem ser introduzidas em células vivas, modificando seu funcionamento e sendo transmitidas para as gerações futuras. Há a perspectiva de que certas doenças hereditárias humanas possam futuramente ser curadas pela substituição dos genes defeituosos, nas células onde eles se expressam, procedimento conhecido como **geneterapia**.

As pesquisas sobre o DNA culminaram, no início do século XXI, com a conclusão do Projeto Genoma Humano, uma ambiciosa empreitada científica cujo objetivo é conhecer todo o conteúdo do genoma humano. Os resultados desse projeto têm mostrado que o sistema biológico é mais complexo do que se imaginava, e que ainda será necessária muita pesquisa para começarmos a compreender os fundamentos da vida.

O Projeto Genoma Humano

O Projeto Genoma Humano teve início oficialmente em outubro de 1990, com a publicação de um plano de pesquisa cujo objetivo era determinar a seqüência de todos os nucleotídios dos 24 cromossomos constituintes do genoma humano (os 22 autossomos e os cromossomos sexuais X e Y). Além disso, outro objetivo do projeto era identificar todos os genes humanos. No plano inicial estava previsto o desenvolvimento de técnicas para análise dos dados e de normas para os problemas éticos, legais e sociais que certamente iriam surgir com o aumento de conhecimento na área. Previa-se, também, o seqüenciamento do genoma de organismos usados como modelo na investigação biológica, como a bactéria *Escherichia coli*, o verme nematódeo *Caenorhabditis elegans*, a mosca *Drosophila melanogaster* e o camundongo *Mus musculus*, entre outros.

O projeto foi iniciado por duas agências governamentais norte-americanas, o Departamento de Energia e o Instituto Nacional de Saúde (NIH), com a participação de universidades e institutos de pesquisa de diversos países. Em maio de 1998, uma companhia particular fundada especialmente para esse fim, a Celera Genomics, entrou na disputa pela pesquisa sobre o seqüenciamento do genoma humano, prevendo completá-lo em apenas três anos, o que significava quatro anos antes do previsto pelo consórcio público. A principal diferença entre os dois projetos era o método utilizado para a determinação das seqüências de nucleotídios.

A estratégia do consórcio público era dividir cada cromossomo em grandes fragmentos e determinar a seqüência de nucleotídios de fragmentos adjacentes. A Celera adotou a estratégia de partir todo o genoma em pequenos fragmentos, seqüenciar cada um deles e, em seguida, ordená-los por meio da sobreposição de suas extremidades, o que demandaria a utilização de poderosos computadores e sofisticados programas de computação. Outra diferença é que a Celera não pretendia tornar públicos os dados obtidos, mas patenteá-los e comercializá-los.

Tendo em vista a possibilidade de uma empresa particular tornar-se proprietária exclusiva de um patrimônio da humanidade — o genoma humano —, o consórcio público redobrou os esforços para concluir o projeto em menor tempo. Finalmente, em 26 de junho de 2000, os pesquisadores Francis Collins (líder do consórcio público) e Craig Venter (presidente da Celera Genomics) anunciaram na Casa Branca, sede do governo dos Estados Unidos da América, na cidade de Washington, a conclusão de um esboço geral do genoma humano. Os trabalhos relatando a conclusão do seqüenciamento foram publicados nas revistas científicas *Science* (a parte realizada pela Celera) e *Nature* (a parte realizada pelo consórcio público) em fevereiro de 2001.

O genoma humano é constituído por cerca de 3 bilhões de pares de nucleotídios. Para se ter idéia do que isso representa, se escrevêssemos a seqüência de iniciais das bases (A, T, C e G) de apenas uma das cadeias do DNA humano em tipos bem pequenos, preencheríamos mais de 200 volumes equivalentes a grossas listas telefônicas.

Apenas 3% dos 3 bilhões de pares de bases do genoma humano correspondem a genes; 97% são seqüências não-codificantes, isto é, não transcritas para moléculas de RNA. O número total de genes humanos — entre 30 mil e 40 mil — é bem menor do que se imaginava. Isso nos coloca em pé de igualdade com os camundongos e pouco acima das moscas quanto ao número de genes, cujo genoma possui apenas 13 mil genes. Assim, a quantidade de genes não é o que faz a diferença, e sim como eles funcionam e suas relações entre si e com o ambiente.

O seqüenciamento do DNA humano revelou que muitos de nossos genes são semelhantes aos de bactérias e de vírus. Cerca de 40% de nossos genes são semelhantes aos dos vermes nematódeos, 60% são semelhantes aos de moscas e nada menos que 90% de nossos genes são semelhantes aos dos camundongos. Diferimos de nosso parente mais próximo, o chimpanzé, em apenas 1% das seqüências de DNA, ou seja, em apenas um par de bases nitrogenadas a cada 100 pares.

Os esforços para o seqüenciamento do genoma humano têm levado a um grande desenvolvimento tecnológico, o que facilita o seqüenciamento de genomas de outras espécies de interesse. No Brasil, o primeiro genoma a ser totalmente seqüenciado foi o da bactéria *Xillela fastidiosa*, espécie que causa a doença dos laranjais conhecida como amarelinho. Outros projetos genomas têm sido desenvolvidos em diversos estados brasileiros, com auxílio de agências financiadoras de pesquisa federais e estaduais.

QUADRO 8.3 • Seqüenciamento do DNA

A determinação da seqüência de bases nitrogenadas de uma cadeia de DNA baseia-se em princípios engenhosos, que apresentamos a seguir. Como ponto de partida, vamos relembrar como ocorre a síntese da cadeia complementar de nucleotídios durante a duplicação do DNA. A síntese do DNA é catalisada por uma enzima denominada DNA polimerase, que orienta o emparelhamento de nucleotídios livres a uma cadeia modelo de DNA, unindo os nucleotídios à medida que eles são ordenados.

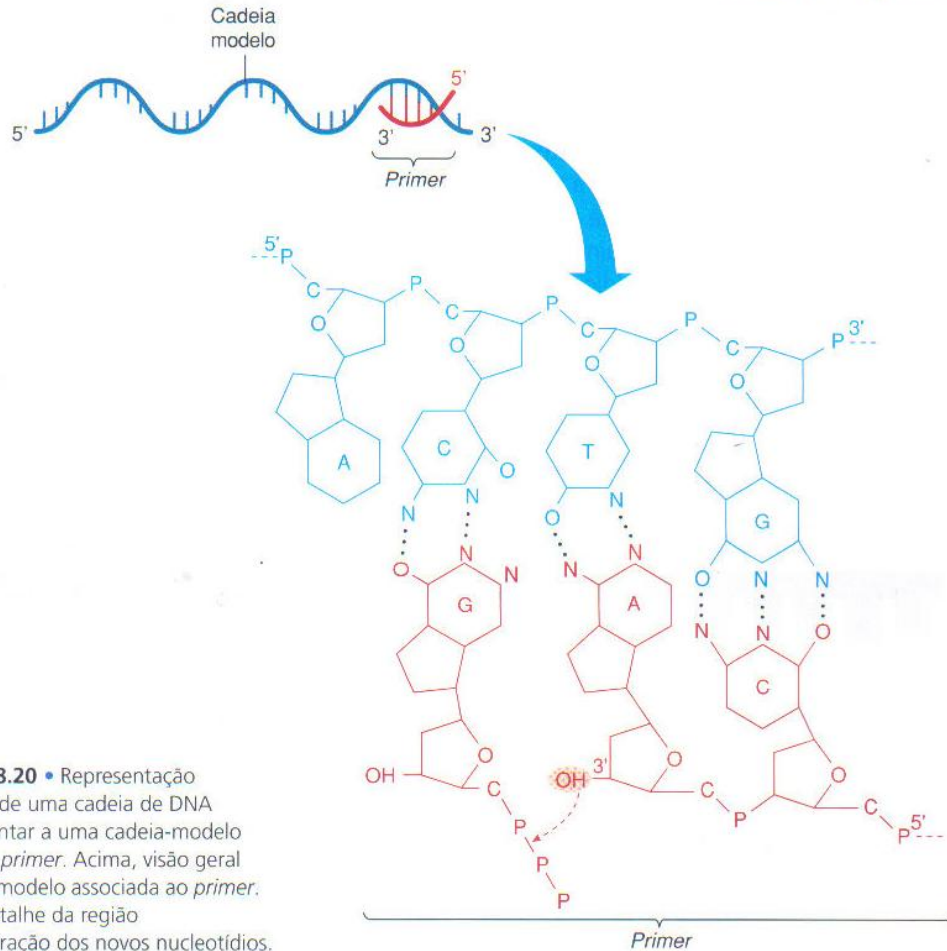
A polimerase do DNA não consegue iniciar, sozinha, a síntese de uma cadeia de DNA. Ela necessita de uma pequena cadeia de nucleotídios, denominada seqüência ***primer***, emparelhada à cadeia modelo, para promover a incorporação de nucleotídios livres a uma das extremidades do *primer*, onde se encontra a hidroxila (-OH) livre do carbono 3' da desoxirribose do último nucleotídio. **(Fig. 8.20)**

A hidroxila livre do carbono 3' participa da ligação ao nucleotídio seguinte, que permite à cadeia crescer. Se o último nucleotídio de uma cadeia de DNA em processo de síntese não possuir uma hidroxila no carbono 3', a síntese será interrompida, pois não há como ligar o nucleotídio seguinte.

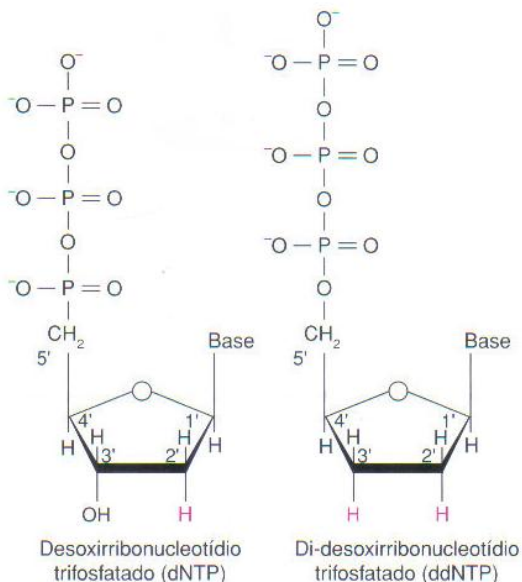
O seqüenciamento de uma cadeia de DNA baseia-se justamente na interrupção da síntese da cadeia complementar, pela incorporação de nucleotídios modificados quimicamente. Esses nucleotídios diferem dos normais por não possuir a hidroxila no carbono 3' de suas pentoses, que são, portanto, di-desoxirriboses (possuem dois átomos de oxigênio a menos que a ribose). **(Fig. 8.21)**

Um di-desoxirribonucleotídio, quando incorporado a uma cadeia polinucleotídica por ação da polimerase do DNA, impede a incorporação do nucleotídio seguinte, interrompendo a síntese da cadeia nesse ponto. A razão dessa interrupção deve-se ao seguinte: como é a hidroxila do carbono 3' da pentose que estabelece a união com o fosfato do próximo nucleotídio a ser incorporado na cadeia em crescimento, sua ausência no di-desoxirribonucleotídio impede a reação de união, e a síntese da cadeia é interrompida.

Em linhas gerais, o processo de seqüenciamento consiste na síntese de cadeias complementares aos segmentos de DNA cuja seqüência de bases nitrogenadas se quer determinar, na presença de pequenas quantidades de cada um dos tipos de di-desoxirribonucleotídios, misturados aos nucleotídios normais. Após algum tempo, a reação é interrompida e o meio é alcalinizado, o que desfaz as pontes de hidrogênio e separa as cadeias modelos das cadeias complementares sintetizadas. Essas serão de diversos tamanhos, em decorrência da incorporação aleatória dos

→

▶ **Figura 8.20** • Representação da síntese de uma cadeia de DNA complementar a uma cadeia-modelo a partir de *primer*. Acima, visão geral da cadeia-modelo associada ao *primer*. Abaixo, detalhe da região de incorporação dos novos nucleotídios.

Desoxirribonucleotídio trifosfatado (dNTP)

Di-desoxirribonucleotídio trifosfatado (ddNTP)

▲ **Figura 8.21** • À esquerda, estrutura molecular de um desoxirribonucleotídio normal e, à direita, de um di-desoxirribonucleotídio utilizado para interromper a síntese do DNA nas reações de seqüenciamento.

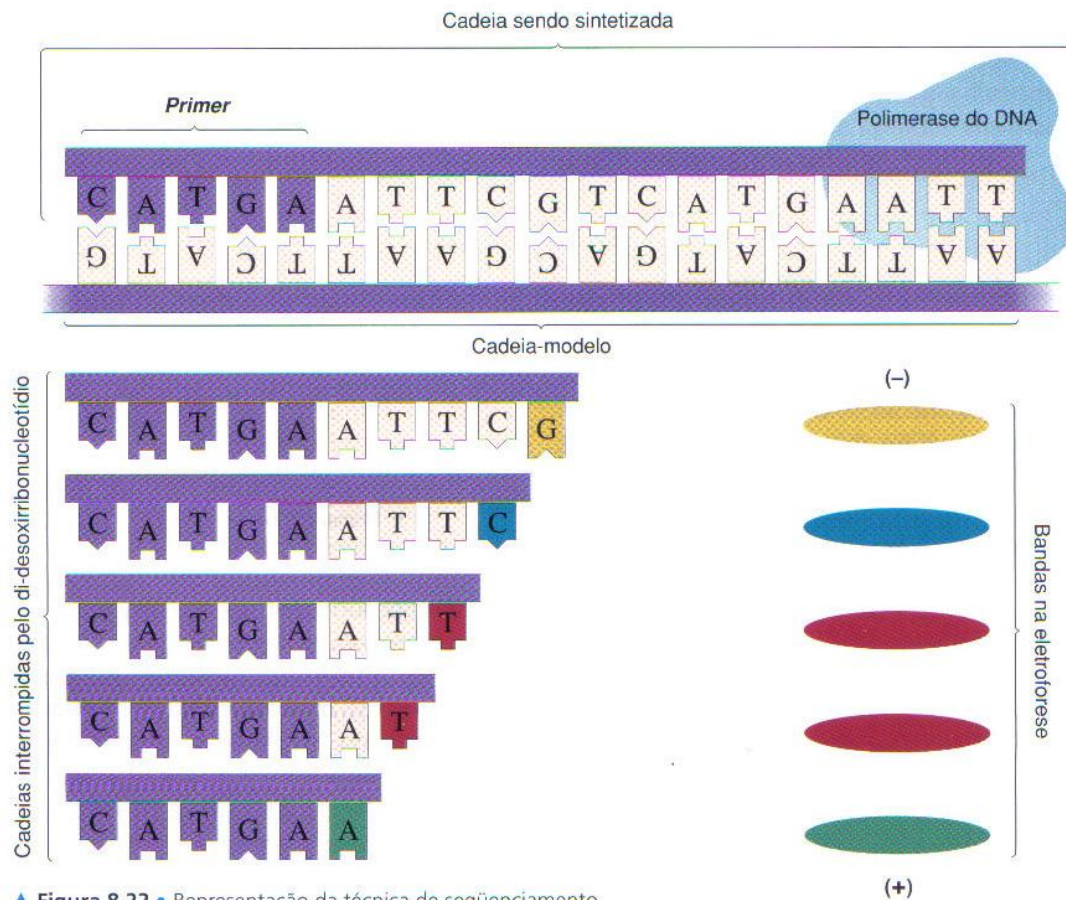
di-desoxirribonucleotídios e da conseqüente interrupção da síntese em diferentes pontos da cadeia.

O passo seguinte é organizar, pelo tamanho, os fragmentos de DNA obtidos na reação de seqüenciamento, o que é feito por meio da técnica de eletroforese. A técnica de eletroforese utilizada no seqüenciamento é sensível a ponto de separar fragmentos que diferem em tamanho por um único nucleotídio.

Cada um dos quatro tipos de di-desoxirribonucleotídio da mistura de reação está unido a um tipo particular de fluorocromo, uma substância que emite luz de uma cor específica quando excitado por *laser*. Em geral, o fluorocromo associado à timina emite luz vermelha, o associado à adenina emite luz verde, o associado à citosina emite luz azul e o associado à guanina emite luz amarela. Dessa maneira, é possível identificar, pela cor que o fluorocromo emite quando excitado por *laser*, qual foi o último nucleotídio incorporado em um fragmento de DNA cuja síntese foi interrompida. Assim, se um fragmento emitir luz vermelha, sa-

→

beremos que o di-desoxirribonucleotídio que interrompeu sua síntese possuía a base timina. Se determinarmos o tamanho desse fragmento de DNA, saberemos a posição dessa timina na cadeia; por exemplo, se ele tiver oito nucleotídios, saberemos que a oitava base nitrogenada da cadeia é a timina. Suponha que na síntese interrompida de um segmento de DNA foram obtidos os seguintes fragmentos: de cor verde com seis nucleotídios, de cor vermelha com sete nucleotídios, de cor vermelha com oito nucleotídios, de cor azul com nove nucleotídios e de cor amarela com dez nucleotídios. Pode-se concluir, então, que a seqüência de bases nitrogenadas nas posições 6, 7, 8, 9 e 10 da cadeia que está sendo sintetizada é ATTCG e que na região correspondente da cadeia-modelo a seqüência é TAAGC.

Quando são iluminados por raios *laser*, as faixas correspondentes aos fragmentos de diferentes tamanhos brilham em diferentes cores, indicativas do último nucleotídio marcado incorporado. Com isso, determina-se a seqüência de bases da cadeia sintetizada e, conseqüentemente, da cadeia modelo, que lhe é complementar. **(Fig. 8.22)**

▲ **Figura 8.22** • Representação da técnica de seqüenciamento do DNA por meio da interrupção aleatória da síntese da cadeia complementar pela incorporação de di-desoxirribonucleotídios.

Terapia gênica

O sucesso da produção de animais transgênicos abriu a perspectiva de correção de doenças genéticas, o que se pode chamar **geneterapia**. Teoricamente, seria possível substituir ou adicionar na pessoa doente uma cópia correta do alelo alterado e responsável por certas doenças genéticas.

Apesar de essa metodologia ainda não ser realidade, muitos já se preocupam com os problemas éticos que ela possa trazer. Alguns argumentam que a geneterapia poderia levar a um controle da distribuição de genes humanos. Outros acreditam que não haveria nenhuma diferença entre a engenharia genética de células humanas e outros métodos convencionais de terapia.

LEITURA

DESDOBRAMENTOS DO PROJETO GENOMA HUMANO

[...] foi o anúncio triunfal de James D. Watson e Francis Crick em 1953 que convenceu os biólogos de que não apenas os genes são moléculas reais, mas também de que eles são constituídos de nada mais misterioso que ácido desoxirribonucléico. Assim, por volta da metade do século XX, todas as dúvidas restantes sobre a materialidade do gene foram descartadas e o caminho aberto para que o gene se tornasse o conceito fundamental capaz de unificar toda a Biologia. Além do mais, a identificação do DNA como o material genético nutriu uma nova área de análises, na qual as poderosas técnicas da genética molecular substituiriam as da genética clássica. Como todos sabem, o progresso resultante foi espetacular, e continua a acelerar.

De muitas maneiras, os avanços dos últimos 25 anos foram os mais dramáticos do século (assim como os mais divulgados) e eles surgiram principalmente como uma conseqüência, primeiro, do advento da tecnologia do DNA recombinante em meados dos anos 1970, e, segundo, pelo lançamento do Projeto Genoma Humano (PGH), em 1990. Apoiada nos avanços fenomenais da Genética Molecular, essa empreitada — que tem um nome enganoso, pois sua missão tem sido não apenas de seqüenciar o genoma humano, mas também os genomas de outros organismos de interesse para biólogos — prometeu revelar o mapa genético que diz quem somos. De fato, seria difícil imaginar um clímax mais dramático para os esforços de um século inteiro que o recente anúncio de que um esboço da seqüência total do genoma humano estará completo a tempo de marcar o final do século. No mínimo, esse anúncio chega como o clímax adequado da carreira do homem que foi um dos principais impulsionadores desse projeto: como o próprio Watson disse, "Comece com a dupla-hélice e termine com o genoma humano".

Quando o Projeto Genoma Humano foi inicialmente proposto, em meados dos anos 1980, despertou uma boa dose de ceticismo. Mas hoje, quando seu ritmo ultrapassa todas as expectativas, restam poucos céticos. Até agora o genoma completo de mais de 25 organismos microbianos foram seqüenciados [dados do ano 2000], incluindo o daquela ilustre bactéria, a *Escherichia coli*, na qual a Biologia molecular afiou seus dentes. Genomas de modelos mais sofisticados de organismos também foram seqüenciados: o levedo foi o primeiro, seguido em 1998 pelo nematódeo *Caenorhabditis elegans* — o primeiro organismo superior a ser seqüenciado. A mosca das frutas, a *Drosophila*, o mais famoso dos organismos usados como modelo na história da Genética, teve sua estréia em fevereiro de 2000. A tarefa de seqüenciar o próprio genoma humano começou relativamente tarde, mas seu progresso foi de tirar o fôlego: menos de 3% do genoma humano havia sido seqüenciado ao final de 1997; em 30 de novembro de 1998, essa cifra havia subido para 7,1%; em 5 de setembro de 1999, alcançava 22% e, ao fim de 1999, 47%. A expectativa é de que tenhamos o esboço da seqüência completa do genoma humano antes do final do ano 2000[2].

Confesso haver sido um dos críticos iniciais. Como muitos outros, acreditava que um foco tão exclusivo no seqüenciamento da informação genética era, ao mesmo tempo, mal dirigido e equivocado. Mas hoje estou pronta a compartilhar o entusiasmo geral pelas realizações do PGH, embora por uma perspectiva não muito usual. O que é mais impressionante para mim não é tanto a maneira pela qual o PGH satisfez nossas expectativas, mas a maneira pela qual ele as transformou. [...] Ao contrário de todas as expectativas, em vez de apoiar as noções familiares de determinismo genético que adquiriram tão grande poder na imaginação popular, esses resultados criaram desafios críticos a essas noções clássicas. Hoje, a proeminência dos genes, tanto na mídia em geral quanto na imprensa científica, sugere que nessa nova ciência da genômica, a genética do século XX atingiu sua apoteose. Porém, o próprio sucesso que tanto agitou nossa imaginação também minou de forma radical seu conceito fundamental, o conceito de gene. À medida que o PGH apro-

[2] Como sabemos, o anúncio desse esboço foi, na verdade, feito em 13 de fevereiro de 2001. (N.T.)

xima-se da realização de seus objetivos, os biólogos começam a reconhecer que tais objetivos representam não um fim, mas o começo de uma nova era na Biologia. Craig Stevens escreve: "Apenas contemplar as seqüências não pode prever com segurança as funções precisas da infinidade de regiões codificadoras mesmo em um simples genoma!". Por essa razão, continua ele, "a era da análise genômica representa um novo começo, não o começo do fim, da Biologia experimental".

Para perceber como o progresso da genômica começou a transformar a maneira pela qual muitos biólogos pensam sobre os genes e a Genética, e até sobre o significado do próprio Projeto Genoma, é bom recordar a expectativa com a qual esse projeto começou. Há uma década, muitos biólogos falavam como se o seqüenciamento pudesse, por si só, prover tudo o que era necessário para compreender a função biológica. Explicitando sua "Visão do Cálice Sagrado", Walter Gilbert escreveu: "A seqüência de três bilhões de bases nucleotídicas pode ser posta em um único disco compacto (CD), e seremos capazes de puxar um CD do bolso e dizer: 'Aqui está um ser humano; sou eu!'". Hoje quase ninguém faria declaração tão provocante. Dúvidas referentes à adequação de informações sobre seqüenciamento para uma compreensão da função biológica tornaram-se ubíquas, isto é, difundidas, mesmo entre biólogos moleculares, e, em grande parte, como conseqüência da crescente sofisticação da pesquisa genômica. Em vez de uma Pedra de Roseta, o geneticista molecular William Gelbart sugeriu que "pode ser mais apropriado comparar a seqüência do genoma humano ao disco de Phaesto[3]: um conjunto de inscrições ainda a decifrar encontradas em um palácio minóico... Com relação aos A's, T's, G's e C's da seqüência genômica, em grande parte, somos analfabetos funcionais".

Agora que o genoma de vários organismos inferiores foi totalmente seqüenciado, o apelo por uma nova fase da análise do genoma — uma genômica funcional em vez de uma genômica estrutural — é ouvido com freqüência crescente. Hieter e Boguski definem a genômica funcional como "o desenvolvimento e a aplicação de abordagens experimentais globais (amplas como o genoma, ou como o sistema inteiro) para avaliar a função gênica, fazendo uso da informação e dos reagentes fornecidos pela genômica estrutural". Em seu modo de ver, a seqüência não surge mais como produto final mas sim como uma ferramenta: "O término recente do seqüenciamento do genoma do levedo forneceu a matéria-prima para explorar a potencialidade da abordagem da genômica funcional". Em um clima semelhante, a expectativa do seqüenciamento completo do genoma da *Drosophila* encontrou os geneticistas que estudam esse organismo preparando-se para uma grande guinada. Como Burtis e Halley colocam, eles estão se preparando "para o enorme trabalho que reside em correlacionar a seqüência primária do DNA com a função gênica... Essa conexão é essencial se quisermos dar significado biológico pleno à enxurrada de dados brutos produzida por esse e outros projetos de seqüenciamento de organismos 'modelo'".

É um momento raro e maravilhoso quando o sucesso nos ensina humildade, e esse, afirmo, é precisamente o momento no qual nos encontramos ao final do século XX. Na verdade, de todos os benefícios com que a pesquisa genômica nos brindou, essa humildade, em última análise, pode ser a sua melhor contribuição. Por quase cinqüenta anos, embalamo-nos com a crença de que ao descobrir a base molecular da informação genética, estaríamos encontrando o "segredo da vida"; estávamos confiantes de que se pudéssemos apenas decodificar a seqüência de nucleotídios do DNA, poderíamos compreender o "programa" que torna o organismo o que ele é. E nos surpreendíamos por a resposta parecer tão simples. Mas agora, no apelo por uma genômica funcional, podemos ler pelo menos um reconhecimento tácito de quão grande é o abismo entre "informação" genética e significado biológico.

É claro, a existência desse abismo foi intuída há muito tempo, e, não sem freqüência, podíamos ouvir vozes acauteladoras tentando nos prevenir. Somente agora, porém, começamos a sondar as profundezas desse abismo, maravilhando-nos não com a simplicidade dos segredos da vida, mas com sua complexidade. Pode-se dizer que a genética estrutural nos deu a intuição de que precisávamos para confrontar nosso próprio orgulho, intuição que pode iluminar os limites da visão com a qual começamos.

- **Fonte:** Evelyn Fox Keller, *O século do gene*. Belo Horizonte: Crisálida, 2002. p. 15-19. *(Adaptação nossa)*

---

3 Referência às inscrições da civilização cretense (3000-1100 a.C.), cujo significado ainda não foi decifrado, ao contrário dos hieróglifos egípcios, decifrados graças a uma inscrição trilíngüe (em hieróglifos, em caracteres demóticos e em sua tradução grega) em uma pedra encontrada em 1799, na cidade egípcia de Roseta. (N.E.)

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

8.1 Melhoramento genético

1. Em que consiste o chamado melhoramento de plantas e de animais? Como ele era realizado antes do advento da Genética?
2. Conceitue heterose, ou vigor híbrido.
3. Como propagar plantas conservando suas características genéticas na descendência?
4. Como propagar linhagens animais e conservar suas características genéticas na descendência?
5. Que tipo de problema pode ser gerado pela endogamia?

8.2 Aconselhamento genético e prevenção de doenças hereditárias

6. O que se entende por aconselhamento genético?
7. Em que situações é recomendável que se procure um serviço de aconselhamento genético?
8. O que são alelos deletérios e qual é sua importância para o aconselhamento genético?
9. Qual é o fundamento biológico que justifica o desaconselhamento de casamentos consangüíneos?
10. Em que consiste o diagnóstico pré-natal?
11. Em que consiste a amniocentese?
12. Em que consiste a amostragem vilo-coriônica?

8.3 A Genética Molecular e suas aplicações

13. Conceitue endonuclease de restrição.
14. Qual é o provável papel das endonucleases na natureza?
15. Descreva sucintamente a ação de uma enzima de restrição sobre o DNA.
16. Qual é a importância da técnica de eletroforese no estudo do DNA?
17. Como se podem utilizar endonucleases de restrição para comparar moléculas de DNA?
18. Em que consiste a clonagem molecular?
19. Descreva brevemente como se faz a clonagem molecular utilizando vírus como vetor.
20. O que são *YAC*, ou cromosssomos artificiais de levedura?
21. O que são organismos transgênicos?

8.4 Desvendando o genoma humano

22. Quais eram os principais objetivos do Projeto Genoma Humano?
23. Caracterize o genoma humano quanto ao tamanho, número de genes e grau de semelhança com genomas de outros animais.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

24. A utilização do conhecimento genético para obter organismos com características úteis à nossa espécie é chamado
    a) clonagem.
    b) engenharia genética.
    c) melhoramento genético.
    d) vigor híbrido, ou heterose.
25. A "superioridade" da descendência sobre as linhagens parentais, observada em certos tipos de cruzamentos genéticos, é conhecida como
    a) clonagem.
    b) heterose, ou vigor híbrido.
    c) homozigose.
    d) recombinação genética.
26. A existência de diferenças genéticas entre os indivíduos de uma população é chamada de
    a) heterose, ou vigor híbrido.
    b) mutação genética.
    c) recombinação genética.
    d) variabilidade genética.
27. O serviço que explica aos familiares de portadores de doenças genéticas a natureza da enfermidade e a probabilidade de outros nascimentos de afetados na família é chamado de
    a) aconselhamento genético.
    b) amniocentese.
    c) amostragem vilo-coriônica.
    d) geneterapia.
28. Engenharia Genética refere-se ao
    a) conjunto de procedimentos usados na manipulação do DNA.
    b) processo por meio do qual os genes fabricam proteínas.
    c) ramo da Biologia que estuda os genes humanos.
    d) ramo especializado na produção de equipamentos científicos.
29. As diferentes variedades de plantas e de animais que a humanidade utiliza como fonte de alimento foram produzidas por
    a) clonagem molecular.
    b) engenharia genética.
    c) melhoramento genético.
    d) reprodução assexuada.

30. O burro, ou mula, resultante do cruzamento entre jumento e égua, apresenta uma série de características "superiores" às das espécies parentais, sendo um exemplo de
a) clonagem.
b) engenharia genética.
c) melhoramento genético.
d) vigor híbrido, ou heterose.

31. O fato de não existirem duas pessoas idênticas, a não ser gêmeos univitelínicos, é uma evidência de que nossa espécie possui
a) grande variabilidade genética.
b) alto grau de melhoramento genético.
c) muito DNA não-codificante.
d) pequeno número de genes.

32. Duas pessoas que desejem ter filhos e que têm casos de doença hereditária na família devem fazer
a) aconselhamento genético.
b) amniocentese.
c) amostragem vilo-coriônica.
d) eletroforese do DNA.

33. Os casamentos consangüíneos aumentam as chances de nascimento de crianças
a) com maior número de cromossomos sexuais.
b) com ausência de cromossomos sexuais.
c) heterozigóticas para genes deletérios.
d) homozigóticas para genes deletérios.

34. A análise dos cromossomos de fetos cujas mães têm idade superior a 35 anos é aconselhável porque a partir dessa idade aumenta muito a chance de produção de óvulos portadores de alterações
a) no número de cromossomos.
b) no número de mitocôndrias.
c) nos nucléolos.
d) nos genes.

35. Uma ovelha gerada na Inglaterra, chamada Tracy, possuía incorporado em um de seus cromossomos o gene para antitripsina humana; tratava-se, portanto, de um
a) clone.
b) híbrido.
c) plasmídio.
d) transgênico.

36. A soja transgênica, objeto de grande polêmica em diversas partes do mundo, foi produzida por meio da
a) anatomia vegetal.
b) engenharia genética.
c) evolução biológica.
d) eletroforese de proteínas.

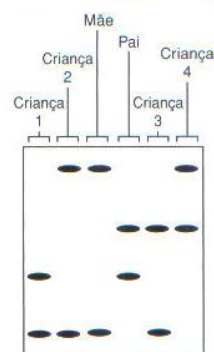
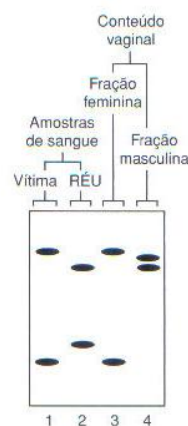
37. Um organismo que possui genes de uma outra espécie incorporados em seu genoma é denominado
a) clone.
b) heterozigótico.
c) homozigótico.
d) transgênico.

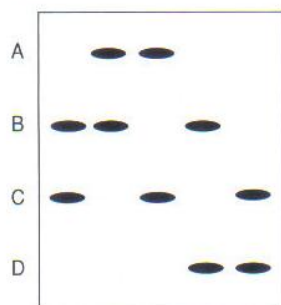
38. Para cortar moléculas de DNA em pontos específicos utiliza-se
a) enzimas de restrição.
b) polimerases do DNA.
c) polimerases do RNA.
d) ribonucleotídios ativados.

39. Amostras de DNA podem ser identificadas pelo conjunto de fragmentos obtidos pelo corte com enzimas de restrição e sua posterior separação por
a) eletroforese.
b) melhoramento genético.
c) transcrição gênica.
d) origem de replicação.

QUESTÕES DISCURSIVAS

40. Informe-se sobre a polêmica que envolve a utilização de organismos transgênicos e redija um breve texto sobre o assunto. Quais são os principais argumentos contra e a favor da utilização desses organismos?

41. O esquema mostra padrões de bandas de um casal e de quatro de seus filhos detectados com uma sonda para uma determinada VNTR. Qual é a criança menos provável de ser filha biológica do casal?

42. O esquema mostra padrões de bandas de pessoas envolvidas em uma investigação policial de um caso de estupro, detectados com uma sonda para uma determinada VNTR. As amostras de DNA foram aplicadas nas seguintes raias, da esquerda para a direita:

1 – amostra de sangue da vítima;
2 – amostra de sangue do acusado;
3 – fração feminina do esfregaço vaginal da vítima;
4 – fração masculina do esfregaço vaginal da vítima;
Com qual das conclusões os resultados são mais condizentes? Justifique sua resposta.
a) O suspeito é culpado.
b) O suspeito pode ser culpado, mas mais testes devem ser feitos.
c) O esfregaço vaginal é de uma outra vítima.
d) O suspeito é excluído como fonte do masculino presente na vítima.

43. Muitas vezes, os investigadores necessitam reconstruir o perfil de DNA de uma pessoa ausente a partir da análise dos perfis de DNA de parentes próximos. O esquema mostra padrões de bandas de pessoas, detectados com uma sonda para uma determinada VNTR, envolvidas em uma situação como essa. Nesse caso, a mãe de quatro crianças está desaparecida. Todas as crianças têm o mesmo pai biológico. Os resultados de um exame de DNA (*fingerprint*) das quatro crianças e do pai são mostrados na figura. O pesquisador forense, porém, esqueceu de etiquetar a raia correspondente ao DNA do pai. Mesmo assim, é possível deduzir quais das bandas (A-D) estão presentes na mãe desaparecida; identifique-as.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

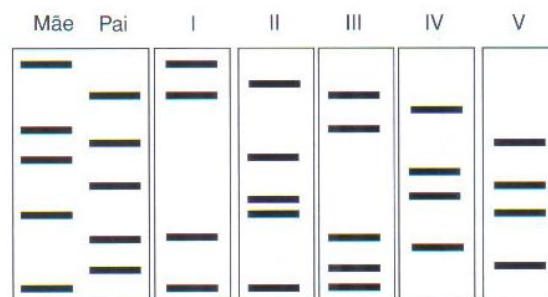
44. (UFF-RJ) Em um acidente, embora os corpos das vítimas fatais fiquem queimados e irreconhecíveis, foi possível preparar, a partir de fragmentos de tecidos, amostras de DNA nuclear e mitocondrial de todos os mortos. Faleceram no acidente dois filhos de uma senhora, cada um de um casamento diferente.
Uma das formas possíveis de identificar os despojos dos filhos dessa senhora consiste em verificar se existe homologia do
a) DNA mitocondrial da senhora com o DNA mitocondrial das vítimas.
b) DNA mitocondrial da senhora com o DNA nuclear das vítimas.
c) DNA nuclear do marido e do ex-marido da senhora com o DNA mitocondrial das vítimas.
d) DNA mitocondrial do marido e do ex-marido da senhora com o DNA mitocondrial das vítimas.
e) DNA nuclear da senhora com o DNA mitocondrial das vítimas.

45. (Unifesp) Nos exames para teste de paternidade, o DNA, quando extraído do sangue, é obtido
a) das hemácias e dos leucócitos, mas não do plasma.
b) das hemácias, dos leucócitos e do plasma.
c) das hemácias, o principal componente do sangue.
d) dos leucócitos, principais células de defesa do sangue.
e) dos leucócitos e das globulinas, mas não das hemácias.

46. (UFSM-RS) O texto a seguir apresenta os resultados do projeto de estudo do genoma da '*Xylella fastidiosa*', no ano de 1999.
"Trabalhando sem parar desde o final de 1997, eles (os pesquisadores) já decifraram 75% do código genético dessa bactéria. A idéia é descobrir, até abril, a seqüência de substâncias que constituem os cerca de 2000 genes da cadeia de DNA, ou seja, do genoma do parasita."

"Superinteressante", 13(1):63. Jan., 1999. (adaptado)

Uma modificação que poderia ser feita nesse texto, para torná-lo mais preciso, é a substituição de:
a) seqüência de substâncias por seqüência de nucleotídios.
b) código genético por seqüência de aminoácidos.
c) código genético por conjunto total de proteínas.
d) cadeia de DNA por cadeia de RNA.
e) seqüência de substâncias por seqüência de aminoácidos.

47. (UFV) O exame de paternidade tem sido muito utilizado na medicina forense. Esse teste baseia-se na identificação de marcas genéticas específicas que podem ser encontradas no DNA da mãe, do pai e dos filhos. O resultado do teste, representado a seguir, contém padrões dessas marcas de uma determinada família.

Com base neste resultado, assinale a alternativa INCORRETA:
a) I é filho biológico do casal.
b) II não é filho deste pai.

c) V não pode ser filho biológico deste casal.
d) IV pode ser filho adotivo do casal.
e) III é irmão biológico de I.

48. (Fuvest-SP) O anúncio do seqüenciamento do genoma humano, em 21 de junho de 2000, significa que os cientistas determinaram
a) a seqüência de nucleotídios dos cromossomos humanos.
b) todos os tipos de proteína codificados pelos genes humanos.
c) a seqüência de aminoácidos do DNA humano.
d) a seqüência de aminoácidos de todas as proteínas humanas.
e) o número correto de cromossomos da espécie humana.

49. (UFC-CE) As principais ferramentas empregadas na tecnologia do DNA recombinante são as enzimas de restrição, que têm a propriedade de cortar o DNA em pontos específicos. O papel biológico dessas enzimas bacterianas na natureza é, provavelmente:
a) proteger as bactérias contra os vírus bacteriófagos.
b) reparar o DNA bacteriano que sofreu mutação deletéria.
c) auxiliar no processo de duplicação do DNA.
d) auxiliar no processo de transcrição do RNAm.
e) auxiliar no processo de tradução do DNA.

50. (Fatec-SP) As enzimas de restrição são as principais ferramentas bioquímicas empregadas em Engenharia Genética.
Com relação a essas substâncias é correto afirmar que
a) são altamente específicas, cortando o DNA em locais determinados.
b) não existem em seres vivos, sendo exclusivamente produtos da indústria química.
c) atuam como agentes de ligação entre DNA viral e bacteriano.
d) permitem somente a ligação de pedaços de DNA de um mesmo tipo celular.
e) impedem a clonagem de moléculas de DNA recombinante.

51. (Mackenzie-SP) Por sua capacidade de cortar o DNA em pontos específicos, são utilizadas enzimas de restrição na engenharia genética, originando fragmentos dessa molécula. Sobre essas enzimas é INCORRETO afirmar que:
a) reconhecem seqüências específicas de bases nitrogenadas.
b) removem os fosfatos e as pentoses, deixando somente as bases nitrogenadas, que serão manipuladas.
c) cada uma pode originar fragmentos de DNA com tamanhos diferentes.
d) são utilizadas nos atuais testes de DNA.
e) fazendo-se uso delas, pode-se isolar um único gene de um cromossomo.

QUESTÕES DISCURSIVAS

52. (UFSCar-SP) Considerando situações hipotéticas, Maria manteve relações sexuais com dois irmãos, gêmeos dizigóticos, nascendo destas relações Alfredo. Em outra situação, também hipotética, Paula engravidou-se ao manter relações sexuais com dois irmãos, gêmeos monozigóticos, nascendo Renato. Abandonadas, ambas reclamaram na Justiça o reconhecimento de paternidade, determinando o Juiz a realização dos testes de DNA. Após receber os resultados, a Justiça pronunciou-se sobre a paternidade de uma das crianças e ficou impossibilitada de pronunciar-se sobre a paternidade da outra criança. Responda:
a) sobre a paternidade de qual criança o juiz pronunciou-se?
b) por que não pôde o juiz se pronunciar sobre a paternidade da outra criança?

53. (UFRJ) Em Junho de 2001, foi publicada a seqüência quase completa do genoma humano. Esse projeto contou com a participação de diversos laboratórios, que individualmente determinaram a seqüência de vários trechos diferentes do DNA de todos os cromossomos, a partir da amostra de somente um indivíduo, que permaneceu anônimo. Sabe-se, no entanto, que o DNA era de um indivíduo do sexo masculino.
Por que foi importante determinar a seqüência do DNA de um homem e não de uma mulher?

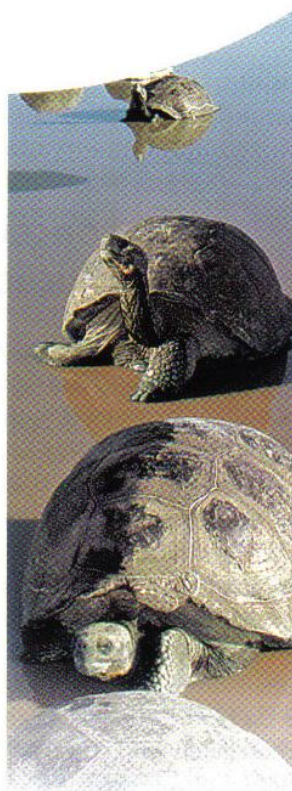
54. (UFRJ) No início do projeto do genoma humano, havia duas estratégias a considerar:
I. seqüencial o DNA total dos cromossomos diretamente;
II. extrair todos os RNAs mensageiros, produzir DNA a partir desses RNAs mensageiros e seqüencial apenas esse DNA.
Nos dois casos, a técnica de seqüenciamento era a mesma.
Por que a segunda estratégia é mais rápida e, portanto, mais econômica?

55. (Ufes) A partir da década dos 1970, as moléculas de ácidos nucléicos da célula passaram a ser exploradas através da utilização de novas metodologias, conhecidas como tecnologia do DNA recombinante. Por meio dessa tecnologia, a medicina e a indústria ganharam alternativas eficientes para a produção, em grande escala, de determinadas proteínas, que antes eram disponíveis em quantidades extremamente reduzidas.
a) Qual é a função das endonucleases de restrição e a das ligases na aplicação da tecnologia anteriormente citada?
b) Explique como a tecnologia do DNA recombinante participa no processo de produção de organismos transgênicos.
c) Cite dois produtos, utilizados pelo homem, que foram obtidos a partir da aplicação da tecnologia do DNA recombinante.

Tartarugas gigantes, Ilha Isabella, Galápagos.

PARTE II

EVOLUÇÃO BIOLÓGICA

CAPÍTULO

9 BREVE HISTÓRIA DAS IDÉIAS EVOLUCIONISTAS

▶ Paleontólogos trabalhando com fósseis de rinocerontes datados em 19 milhões de idade, em Nebraska, EUA.

9.1 O conceito de evolução biológica

A variedade de seres vivos em nosso planeta, isto é, a **biodiversidade**, tem fascinado a humanidade ao longo de sua história. Em praticamente todas as sociedades humanas encontramos explicações míticas ou religiosas para a origem dos seres vivos e de sua diversidade. Na sociedade ocidental, por exemplo, que incorporou tradições judaico-cristãs milenares, difundiu-se a explicação criacionista do universo e dos seres vivos descrita no livro do Gênesis, o primeiro da Bíblia.

Há cerca de dois séculos, começaram a surgir as primeiras explicações científicas para a origem da vida e da biodiversidade. Desde então, os cientistas têm conseguido reunir diversos indícios que permitem explicar a origem dos seres vivos e sua diversificação sem nenhuma interferência sobrenatural. De acordo com as explicações científicas, a enorme variedade de espécies viventes é resultado de processos de transformação e adaptação inerentes à própria vida, que constituem a **evolução biológica**.

As idéias mais consistentes sobre a evolução dos seres vivos foram propostas originalmente pelos naturalistas ingleses Charles Darwin (1809-1882) e Alfred Russel Wallace (1823-1913), em um trabalho conjunto apresentado na reunião da *Linnean Society* de 1º de julho de 1858. Um ano mais tarde, em 1859, Charles Darwin publicou um dos mais importantes livros da história da humanidade, intitulado *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life* (Sobre a origem das espécies por meio da seleção natural, ou a preservação das raças favorecidas na luta pela sobrevivência), que ficou conhecido pelo título simplificado de *A ori-*

gem das espécies. Nesse livro, Darwin lançou as bases científicas da **teoria evolucionista**, ou **evolucionismo**, que trouxe mudanças radicais no pensamento humano e permitiu compreender a relação de parentesco de nossa espécie com as outras espécies biológicas.

O livro de Darwin é considerado um marco na história da ciência. Pode-se dizer que a partir dele teve início uma nova era na Biologia, em que toda reflexão e discussão a respeito da vida só fazem sentido no contexto evolutivo. Como disse o famoso geneticista russo, naturalizado norte-americano, Theodosius Dobzhansky (1900-1975): "Nada em Biologia faz sentido senão sob a luz da evolução". Isso porque, se todas as espécies surgiram pela evolução e diversificação de outras ancestrais, as características dos seres vivos atuais certamente refletem sua história evolutiva. Assim, para compreender mais amplamente o fenômeno vida, é preciso considerá-la sob o enfoque da evolução. Neste capítulo, abordamos os fundamentos das primeiras teorias evolucionistas e apresentamos as principais evidências da evolução biológica.

9.2 O pensamento evolucionista

O surgimento do evolucionismo

Com o surgimento da ciência no início do século XVII, a maneira de compreender o mundo natural e de explicar os fenômenos que nele ocorrem teve um formidável desenvolvimento, que ficou conhecido como **revolução científica**. Desde então, as explicações fornecidas pela ciência têm entrado em conflito com as interpretações literais das descrições bíblicas sobre a natureza. Os trabalhos de Nicolau Copérnico (1473-1543), por exemplo, derrubaram o dogma então vigente de que a Terra era o centro do universo e constituíram um dos exemplos pioneiros de que os escritos religiosos não devem ser interpretados de forma literal.

Os estudos científicos sobre a crosta terrestre, nos séculos XVII e XVIII, mostraram que a Terra existia há muitos milhões de anos, e não há milhares, como até então se pensava. Esses estudos revelaram a existência de restos e vestígios de seres extintos, os fósseis, lançando dúvidas sobre o dogma da imutabilidade das espécies biológicas e de sua existência graças a um ato de criação divina. Apesar de todos os avanços científicos, até meados do século XIX predominou no mundo ocidental o **criacionismo**, teoria segundo a qual todas as espécies vivas foram criadas por ato divino, tal e qual se apresentam hoje. De acordo com a teoria criacionista, o número de espécies foi determinado por Deus no momento da criação.

A partir de meados do século XIX ganhou força a idéia de que os seres vivos se modificaram ao longo do tempo, com novas espécies surgindo a partir de espécies ancestrais que deixaram de existir. Estabelecia-se, assim, a base da teoria evolucionista, ou evolucionismo.

Apesar de o criacionismo e o evolucionismo buscarem explicações para a origem dos seres vivos, há uma diferença fundamental entre as duas teorias: o criacionismo não é científico, pois se baseia em um conjunto de dogmas, isto é, "verdades" consideradas inquestionáveis, que não admitem alternativas de interpretação. A visão científica, por outro lado, parte do princípio de que não há verdades inquestionáveis e que sempre existe a possibilidade de uma explicação considerada verdadeira estar errada. Para a ciência, a única maneira de validar ou refutar uma hipótese é submetê-la continuamente a testes rigorosos. As idéias atualmente aceitas pela ciência são aquelas que, depois de testadas exaustivamente, não foram refutadas. Mesmo assim, as explicações científicas nunca são consideradas verdades absolutas; elas são aceitas enquanto não existirem motivos para se duvidar de sua veracidade, isto é, enquanto elas não forem refutadas pelos testes. A teoria da evolução biológica vem resistindo a todos os testes a que tem sido submetida, sendo a única explicação racional e coerente para o conjunto de fatos sobre a vida em nosso planeta.

As idéias evolucionistas de Lamarck

Idéias evolucionistas são bem antigas e já estavam presentes em escritos de filósofos da Grécia pré-socrática, por exemplo. No entanto, foi somente no final do século XVIII e início do século XIX que alguns naturalistas passaram a adotar idéias evolucionistas para explicar a diversidade do mundo vivo. O mais importante deles foi o francês Jean-Baptiste Antoine de Monet (1744-1829), que, por seu título de Cavaleiro de Lamarck, ficou conhecido como Jean-Baptiste Lamarck. Em 1809, em seu livro *Philosophie zoologique* (Filosofia zoológica), ele propôs a primeira teoria baseada em argumentos coerentes para explicar a evolução biológica. Essa teoria ficou conhecida como **lamarckismo**.

Lamarck acreditava que os organismos atuais surgiram por transformações sucessivas de formas mais primitivas. Ele admitia que os seres vivos mais simples haviam surgido espontaneamente a partir de matéria não-viva, modificando-se ao longo de incontáveis gerações. Para Lamarck, assim como um ovo se desenvolve e evolui para um organismo adulto, o mundo orgânico também evoluíra de organismos mais simples para os mais complexos, culminando com a espécie humana. Ele não acre-

ditava na extinção biológica, mas pensava que o desaparecimento de uma espécie ocorria em conseqüência de sua transformação em outra, ou seja, de sua evolução.

Com base na observação de que certos órgãos corporais se desenvolvem quando são muito utilizados e atrofiam-se quando pouco solicitados, Lamarck elaborou a **lei do uso e do desuso**. Ele supôs, então, que características adquiridas pelo uso intenso ou pela falta de uso dos órgãos poderiam ser transmitidas à descendência; idéia que ficou conhecida como **lei da transmissão de caracteres adquiridos**. Essas duas leis constituem a essência do **lamarckismo**. **(Fig. 9.1)**

Um dos exemplos utilizados por Lamarck para ilustrar suas idéias é a ausência de pernas nas serpentes atuais, atribuída por ele à falta de uso dos membros locomotores nos ancestrais desses animais. A adaptação a um modo de vida rastejante teria levado os ancestrais das serpentes a utilizar pouco as pernas, que tenderiam a se atrofiar (lei do uso e do desuso). A atrofia seria transmitida à descendência (lei da transmissão dos caracteres adquiridos) ao longo das gerações, resultando no desaparecimento completo das pernas nas serpentes atuais.

Hoje sabe-se que as alterações causadas pelo uso ou pelo desuso dos órgãos corporais não se transmitem à descendência, o que invalida a explicação de Lamarck para a evolução biológica. Ele teve, no entanto, o grande mérito de ter chamado a atenção para o fenômeno da adaptação dos seres vivos ao ambiente, que seria resultado de modificações lentas e graduais dos seres vivos ao longo de inúmeras gerações. Por não apresentar um mecanismo convincente para explicar a evolução biológica, e por não ter sugerido relações de parentesco evolutivo entre as diferentes espécies, a teoria de Lamarck não chegou a abalar o criacionismo. Isso só viria a ocorrer um pouco mais tarde, com as idéias evolucionistas de Charles Darwin.

▲ **Figura 9.1** • Jean-Baptiste Antoine de Monet, Cavaleiro de Lamarck, foi um dos primeiros a divulgar as idéias evolucionistas, no início do século XIX.

A importância de Lamarck para o pensamento evolucionista evidencia-se ao lermos o que Darwin escreveu sobre ele, em 1861: "Lamarck foi o primeiro a tirar conclusões excitantes, que despertaram minha atenção. Esse tão justamente celebrado naturalista foi o primeiro a prestar o eminente serviço de chamar a atenção sobre a possibilidade de todas as mudanças do mundo orgânico, e mesmo do inorgânico, serem resultado de leis naturais, e não de interferências milagrosas".

As idéias evolucionistas de Charles Darwin

O naturalista inglês Charles Darwin nasceu em 12 de fevereiro de 1809, casualmente o mesmo ano da publicação do livro de Lamarck, *Filosofia zoológica*. Segundo o renomado evolucionista alemão, naturalizado norte-americano, Ernst Mayr (1904-2005): "Darwin fez mais do que postular a evolução biológica. Ele explicou a evolução naturalmente, usando fenômenos e processos que qualquer um pode observar cotidianamente na natureza". **(Fig. 9.2)**

ON

THE ORIGIN OF SPECIES

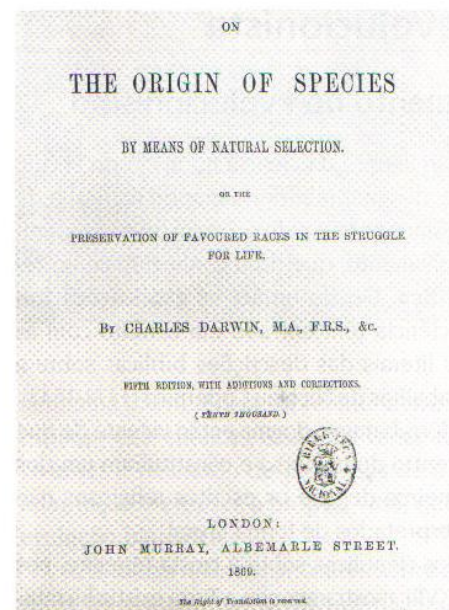
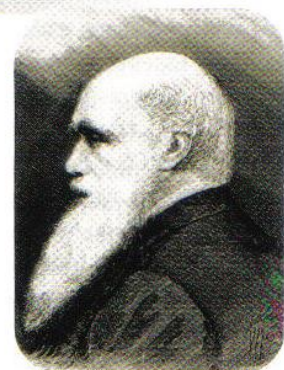
BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

OR THE

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE FOR LIFE.

BY CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.

FIFTH EDITION, WITH ADDITIONS AND CORRECTIONS.

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1869.

▲ **Figura 9.2** • Charles Robert Darwin revolucionou a Biologia com sua teoria evolucionista, publicada no livro *On the origin of species by means of natural selection* (A origem das espécies), em 1859.

O **darwinismo**, como ficou conhecida a teoria evolucionista de Darwin, pode ser resumidamente enunciado em três conclusões, apoiadas em quatro observações:

- **Observação 1** - As populações naturais de todas as espécies tendem a crescer rapidamente, pois o potencial reprodutivo dos seres vivos é muito grande. Isso pode ser verificado, por exemplo, quando se criam determinadas espécies em cativeiro; ao garantir condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento, sempre se observa a elevada capacidade reprodutiva inerente às populações biológicas.
- **Observação 2** - O tamanho das populações naturais, a despeito de seu enorme potencial de crescimento, mantém-se relativamente constante ao longo do tempo, sendo limitado pelo ambiente (disponibilidade de alimento e de locais de procriação, presença de inimigos naturais e de parasitas etc.).

Conclusão 1 - A cada geração morre grande número de indivíduos, muitos deles sem deixar descendentes.

- **Observação 3** - Os indivíduos de uma população diferem quanto a diversas características, inclusive aquelas que influem na capacidade de explorar com sucesso os recursos naturais e de deixar descendentes.

Conclusão 2 - Os indivíduos que sobrevivem e se reproduzem, a cada geração, são preferencialmente os que apresentam determinadas características, relacionadas com a adaptação às condições ambientais. Essa conclusão resume o conceito darwinista de **seleção natural**, ou **sobrevivência dos mais aptos**.

- **Observação 4** - Grande parte das características apresentadas por uma geração é herdada dos pais.

Conclusão 3 - Uma vez que, a cada geração, sobrevivem os mais aptos, eles tendem a transmitir aos descendentes as características relacionadas a essa maior aptidão para sobreviver, isto é, essa maior adaptação. Em outras palavras, a seleção natural favorece, ao longo das gerações sucessivas, a permanência e o aprimoramento de características relacionadas à adaptação.

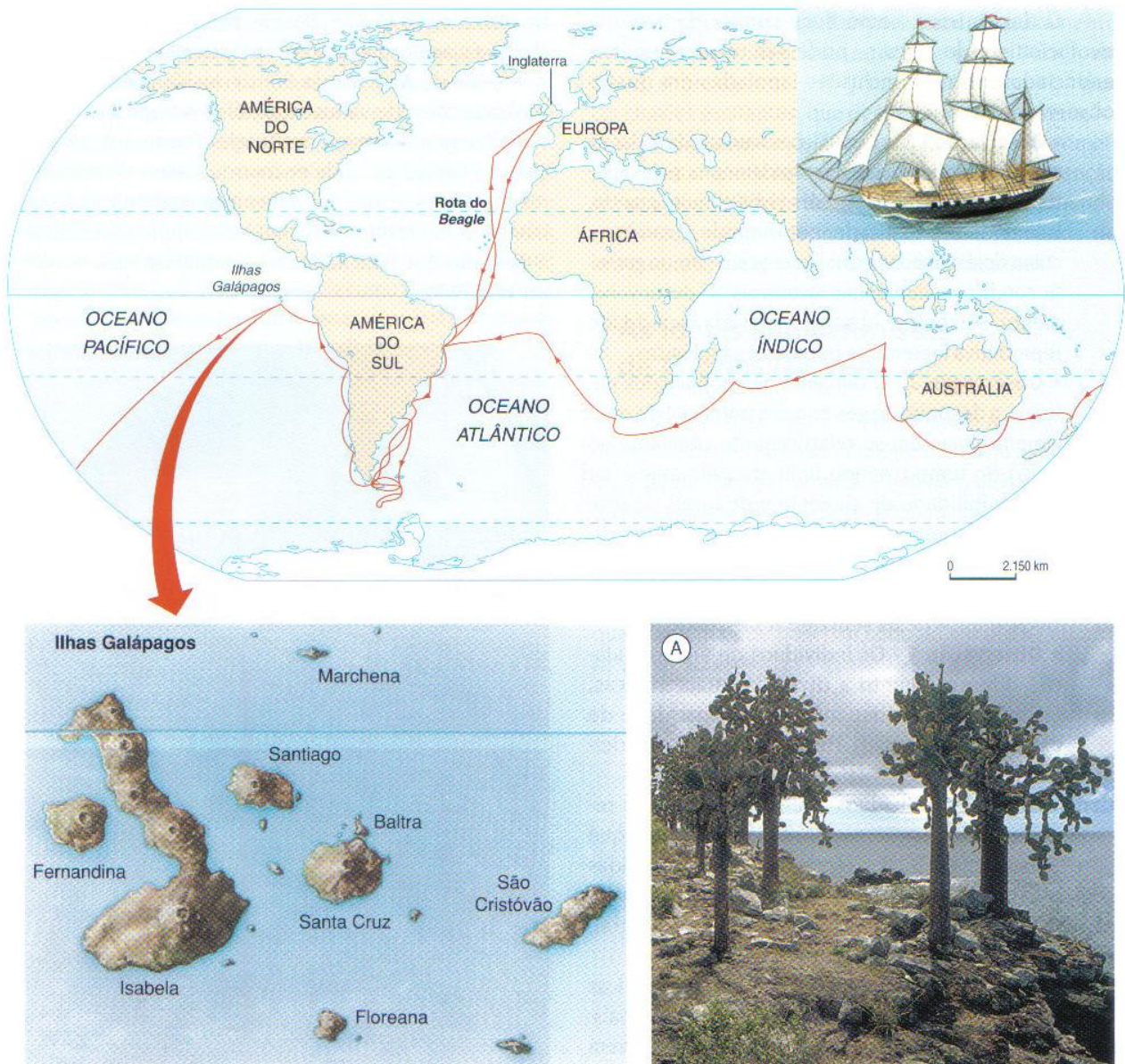
Os princípios fundamentais da teoria evolucionista de Darwin têm sido confirmados pela ciência contemporânea e ampliados pelas modernas descobertas científicas, servindo de base para a elaboração da teoria evolucionista atualmente aceita, que será estudada no próximo capítulo.

A viagem de Darwin ao redor do mundo

Muitas das observações que levaram Charles Darwin a elaborar a teoria evolucionista ocorreram durante sua viagem ao redor do mundo, como naturalista do navio inglês H. S. S. Beagle. Durante os 5 anos que durou a viagem, iniciada em 1831, Darwin visitou diversos locais da América do Sul (inclusive o Brasil) e da Austrália, além de vários arquipélagos tropicais.

Durante a viagem do Beagle, Darwin fez escavações na Patagônia, onde encontrou fósseis de mamíferos já extintos, entre eles o de um animal de grande tamanho, com organização esquelética muito semelhante à dos tatus que hoje habitam o continente sul-americano. **(Fig. 9.3)**

▲ **Figura 9.3** • Acima, reconstrução de um animal extinto, o gliptodonte, feita a partir de restos fósseis como os escavados por Darwin na Argentina. Esse animal é, em muitos aspectos, semelhante aos tatus atuais (foto abaixo), só que cerca de 10 vezes maior.

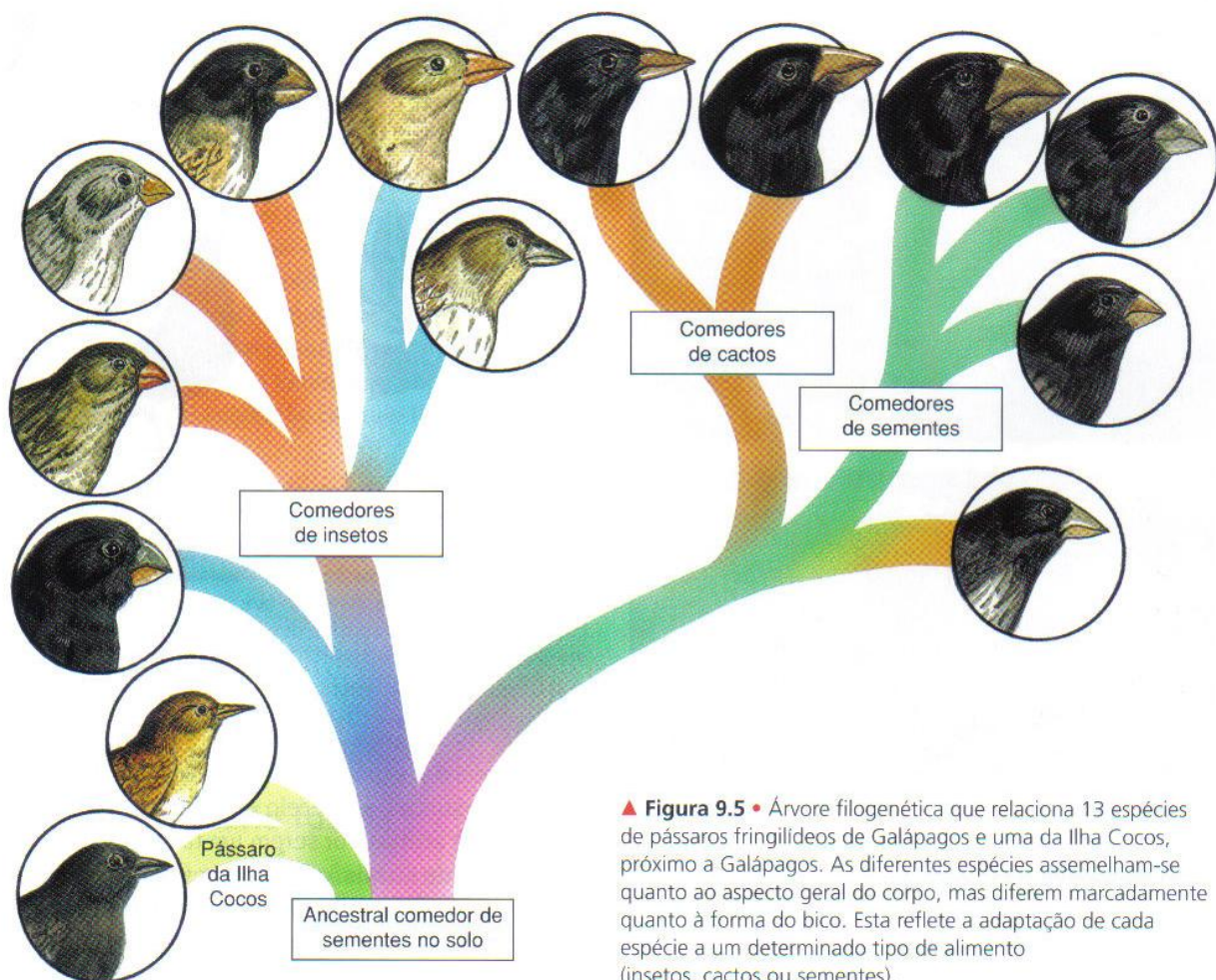
Em Galápagos, um arquipélago formado por ilhas pequenas e áridas situadas no Oceano Pacífico, a cerca de 800 km da costa do Equador, Darwin encontrou uma fauna e uma flora que variavam ligeiramente de ilha para ilha e diferiam bastante das encontradas no continente sul-americano. A natureza peculiar desses habitantes de Galápagos causou forte impressão ao naturalista inglês, desencadeando reflexões que levaram a suas idéias sobre a evolução da vida. **(Fig. 9.4**, na página seguinte**)**

▲ **Figura 9.4** • Acima, roteiro percorrido na viagem de cinco anos realizada pelo navio inglês Beagle (no detalhe, à direita), que levou a bordo o naturalista Charles Darwin. Um dos locais marcantes do roteiro foi o arquipélago de Galápagos, localizado próximo à costa oeste da América do Sul, nas águas territoriais do Equador. Nas fotos, alguns representantes da flora e da fauna das ilhas Galápagos que chamaram a atenção de Darwin. **A.** Cactos arborescentes. **B.** Tartaruga-gigante (em espanhol, *galapago*). **C.** Pingüim. **D.** Iguana-marinho.

Darwin só se convenceu realmente da evolução biológica vários meses após regressar de sua viagem, por volta de 1837. Só então ele pôde compreender o significado de suas observações em Galápagos e em outros locais, ao rever suas anotações e submeter o material coletado na viagem a diversos especialistas.

Uma pergunta básica que Darwin fazia era: se animais e plantas tinham sido criados tal e qual se apresentam hoje, por que espécies distintas, mas nitidamente semelhantes, como pássaros e tartarugas de Galápagos, foram colocadas pelo Criador em ilhas próximas, e não distribuídas homogeneamente pelo mundo? Por que ilhas com clima e condições físicas semelhantes, distantes entre si (como Galápagos e Cabo Verde, por exemplo), não abrigam espécies semelhantes?

Darwin concluiu que a flora e a fauna de ilhas vizinhas são semelhantes porque se originaram de espécies ancestrais comuns, provenientes dos continentes próximos. Em cada uma das ilhas, as populações colonizadoras sofreram adaptações específicas, originando diferentes variedades ou espécies. Por exemplo, as diversas espécies de pássaros fringilídeos de Galápagos provavelmente se originaram de uma única espécie ancestral, oriunda do continente sul-americano. A diversificação da espécie original, de que teriam derivado as diferentes espécies atuais, deu-se como resultado da adaptação às condições particulares das diferentes ilhas do arquipélago. **(Fig. 9.5)**

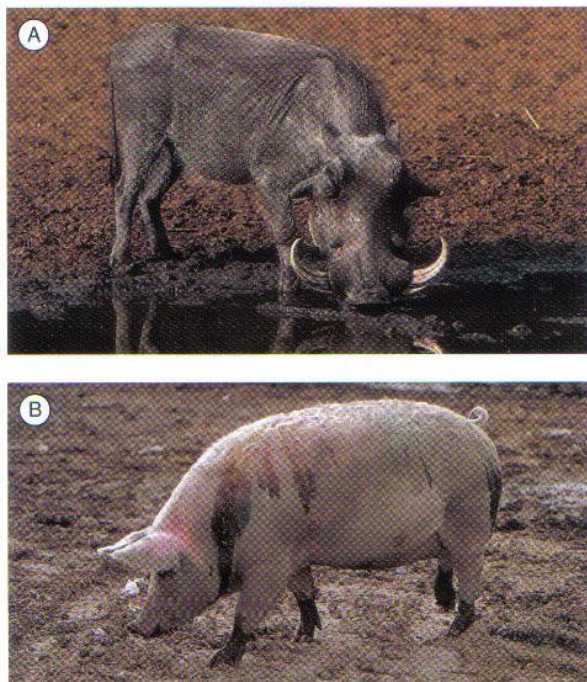
O pensamento de Darwin foi influenciado pelos trabalhos de cientistas famosos, como o astrônomo John Herschel (1792-1871) e o naturalista e viajante Alexandr Humboldt (1767-1835). Este último foi responsável, segundo o próprio Darwin, por seu impulso de viajar para terras desconhecidas em expedições científicas. O trabalho do geólogo e amigo Charles Lyell (1797-1875) também marcou a vida e os estudos de Darwin. Além de levar uma cópia do primeiro volume dos *Princípios de Geologia*, de Lyell, em sua viagem a bordo do Beagle, as primeiras anotações de viagem de Darwin foram sobre temas de Geologia.

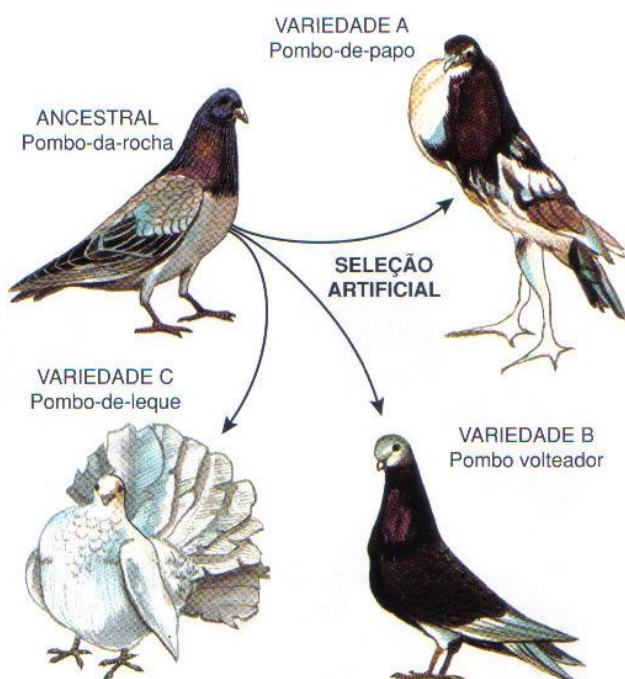
Darwin também aponta a influência das idéias do vigário inglês Thomas R. Malthus (1766-1834) na elaboração do conceito de seleção natural. Em 1798, Malthus sugeriu que a principal causa da miséria humana era o

▲ **Figura 9.5** • Árvore filogenética que relaciona 13 espécies de pássaros fringilídeos de Galápagos e uma da Ilha Cocos, próximo a Galápagos. As diferentes espécies assemelham-se quanto ao aspecto geral do corpo, mas diferem marcadamente quanto à forma do bico. Esta reflete a adaptação de cada espécie a um determinado tipo de alimento (insetos, cactos ou sementes).

descompasso entre o crescimento das populações e a produção de alimentos. Disse ele: "O poder da população é infinitamente maior que o poder da terra de produzir os meios de subsistência para o homem. A população, se não encontra obstáculos, cresce de acordo com uma progressão geométrica. Os meios de subsistência aumentam de acordo com uma progressão aritmética".

Malthus não se referia apenas às populações humanas, mas tentou imaginar a humanidade submetida às mesmas leis gerais que regem populações de outras espécies de seres vivos. Esse foi um dos grandes méritos de seu trabalho, que chamou a atenção de Darwin para as idéias de "luta pela vida" e "sobrevivência dos mais aptos".

O conceito de seleção natural

Um dos argumentos apresentados por Darwin em favor da seleção dos mais aptos baseou-se no estudo de espécies cultivadas. Sabia-se que pelo menos alguns animais domésticos e vegetais cultivados pertenciam a espécies com representantes ainda em estado selvagem. Um fato que chamava a atenção, porém, era que as variedades domésticas diferissem tanto das selvagens, sendo muitas delas classificadas como espécies diferentes. **(Fig. 9.6)**

▲ **Figura 9.6** • Exemplos dos efeitos da domesticação e da seleção praticada pelos criadores. O porco-selvagem (**A**) deu origem ao porco doméstico (**B**). As diferenças entre eles resultam da ação dos criadores, que há muito tempo vêm escolhendo e cruzando animais dotados de características desejadas, entre as quais o aumento de peso é o melhor exemplo.

Darwin dedicou-se à criação de pombos, cujas variedades domésticas originavam-se de uma única espécie selvagem, *Columba livia*, a partir da seleção artificialmente conduzida pelos criadores. Ele concluiu que a seleção artificial podia ser comparada à seleção que a natureza exerce sobre as espécies selvagens. Da mesma forma que os criadores selecionam reprodutores de uma determinada variedade ou raça, permitindo que se reproduzam apenas os que têm as características desejadas, a natureza seleciona, nas espécies selvagens, os indivíduos mais adaptados às condições reinantes. Estes deixam um número proporcionalmente maior de descendentes, contribuindo significativamente para a formação da geração seguinte. Esse é o conceito darwiniano de **seleção natural**. **(Fig. 9.7)**

▲ **Figura 9.7** • Algumas das variedades de pombos obtidas por seleção artificial e analisadas por Darwin. A seu ver, os criadores de pombos, ao selecionar os reprodutores para constituir a próxima geração, atuam de maneira similar à seleção natural. Na natureza, o que determina quais indivíduos irão se reproduzir e deixar descendentes é a seleção natural.

Em 1844, Darwin escreveu um longo trabalho sobre a origem das espécies e a seleção natural. Entretanto, não o publicou por receio de que suas idéias não fossem bem aceitas por serem um tanto revolucionárias. Amigos de Darwin, conhecedores da seriedade de seu trabalho, tentaram inutilmente convencê-lo a publicar o manuscrito antes que outros divulgassem idéias semelhantes. Mas ele resistia.

Finalmente, em junho de 1858, Darwin recebeu do naturalista inglês Alfred Russel Wallace uma carta com conclusões fundamentalmente idênticas às suas. Wallace havia estudado as faunas da Amazônia e das Índias Orientais (denominação dada, na época, a regiões correspondentes, atualmente, à India e outros países orientais), chegando à conclusão de que as espécies se modificam por seleção natural. Darwin ficou assombrado com as semelhanças entre seu trabalho e o de Wallace, especialmente por este também ter-se inspirado na mesma fonte não-biológica, o livro de Malthus, *Ensaio sobre a lei da população*.

Darwin escreveu, então, um resumo de suas idéias, que foram publicadas, juntamente com o trabalho de Wallace, em uma reunião histórica na *Linnean Society of London*, no dia 1º de julho de 1858. Um ano mais tarde, ele publicou seu trabalho completo no livro *A origem das espécies*. As anotações de Darwin confirmam que ele concebeu sua teoria de evolução cerca de 15 anos antes de ter recebido a carta de Wallace, e este admitiu que Darwin realmente havia sido o pioneiro. *A origem das espécies* foi lido por cientistas e leigos, gerando grandes debates, que consolidaram o nome de Charles Darwin como o autor principal da teoria da evolução pela seleção natural, deixando Wallace em segundo plano.

Segundo Ernst Mayr, em seu livro de 2001, *What evolution is*, Darwin percebeu claramente dois aspectos fundamentais da evolução. O primeiro é a transformação gradual das espécies, processo denominado **anagênese**, pelo qual surgem as novas características — apomorfias ou características derivadas — a partir das características primitivas dos ancestrais (relembre no capítulo 1 do volume 2 desta coleção). O segundo aspecto da evolução é a diversificação de novas espécies a partir de uma espécie ancestral, processo denominado **cladogênese**. Esses conceitos serão retomados no capítulo 10.

9.3 Evidências da evolução biológica

Pesquisas em diferentes áreas da Biologia fornecem farta evidência da evolução biológica; entre as principais destacam-se: a) o documentário fóssil; b) a adaptação dos seres vivos a seus ambientes; c) as semelhanças anatômicas, fisiológicas e bioquímicas entre as espécies.

O documentário fóssil

Fósseis (do latim *fossilis*, tirado da terra) são vestígios deixados por seres que viveram no passado. Esses vestígios podem ser ossos, dentes, pegadas impressas em rochas, fezes petrificadas, animais conservados no gelo, por exemplo. O estudo dos fósseis permite aos cientistas deduzir o tamanho e a forma dos organismos que os deixaram, possibilitando a reconstituição de uma imagem mental, possivelmente bem realista, desses organismos quando vivos. Os fósseis constituem a mais forte evidência de que nosso planeta já foi habitado por seres diferentes dos que existem atualmente, sendo uma das principais evidências da evolução biológica. **(Fig. 9.8)**

▲ **Figura 9.8** • Os fósseis constituem a mais forte evidência de que nosso planeta foi habitado por seres diferentes dos atuais, hoje extintos. **A.** Fóssil de mandíbula de dinossauro. **B.** Impressão fóssil de uma folha de gimnosperma datada do período Carbonífero. **C.** Fóssil de estrela-do-mar. **D.** Inseto incluído em âmbar fóssil (resina de árvore petrificada).

Processos de fossilização

Os fósseis são relativamente raros. A não ser em condições especiais, logo que um organismo morre entram em ação agentes decompositores, que destroem completamente seu cadáver. Para que ocorra a **fossilização**, ou seja, a formação de um fóssil, são necessárias condições extremamente favoráveis à preservação do cadáver ou do vestígio deixado pelo organismo. Essas condições podem ocorrer, por exemplo, quando restos de um organismo são cobertos por sedimentos, como areia, argila etc., em geral, em ambientes alagados. Os sedimentos depositados sobre os restos do organismo, com o decorrer do tempo, podem compactar-se originando o que os geólogos denominam rocha sedimentar. No interior da rocha, os vestígios do organismo podem se manter preservados de diversas maneiras, vindo a constituir os diferentes tipos de fóssil. **(Fig. 9.9)**

Um tipo de fóssil conhecido como **molde** forma-se quando os restos soterrados do organismo, depois de deixarem sua forma gravada na rocha, desaparecem completamente. Em alguns casos, o vazio deixado pelos restos orgânicos é preenchido por minerais, que se solidificam formando uma cópia, em rocha, do organismo original. Esse outro tipo de fóssil é conhecido como **contramolde**.

Em certos casos, as substâncias orgânicas do cadáver sepultado na rocha sedimentar são gradualmente substituídas por minerais trazidos pela água. Lentamente, os minerais ocupam o lugar das substâncias orgânicas, em uma substituição tão exata que todos os detalhes do corpo do organismo ficam preservados na rocha, embora não reste mais nada do material orgânico original. Esse processo de fossilização é chamado de **permineralização**, ou **petrificação**. Em certas regiões do Rio Grande do Sul, por exemplo, há troncos petrificados de árvores que viveram há dezenas de milhões de anos. Na Chapada do Araripe, divisa do estado do Ceará com os estados de Pernambuco, Paraíba e Piauí, existem ricos depósitos fossilíferos do período Cretáceo, com peixes e répteis petrificados e moldes de plantas e insetos.

Outros tipos de fóssil são as marcas ou pegadas que um organismo deixou sobre um terreno mole, que posteriormente se transformou em rocha. Esse tipo de fóssil, denominado **impressão**, pode fornecer informações importantes sobre o organismo que o produziu. Por exemplo, em 1978, a cientista inglesa Mary Leakey encontrou, na Tanzânia (África), pegadas de dois hominídeos primitivos, presumivelmente um macho e uma fêmea, caminhando lado a lado. Os estudos mostraram que a rocha onde estava registrado o passeio daqueles nossos parentes distantes tinha nada menos que 3,5 milhões de anos de idade. Pode-se concluir que, naquela época, portanto, os possíveis ancestrais da espécie humana já caminhavam eretos, um traço que nos distingue de todos os outros primatas atuais.

Mais raramente, pode ocorrer a conservação do corpo completo de organismos que viveram no passado. Fósseis completos de insetos, com dezenas de milhões de anos, são encontrados no interior de resina solidificada de plantas, chamada de âmbar fóssil. Corpos completos de mamutes, animais peludos semelhantes a elefantes, com mais de 30 mil anos de idade, foram encontrados sob as geleiras do Ártico.

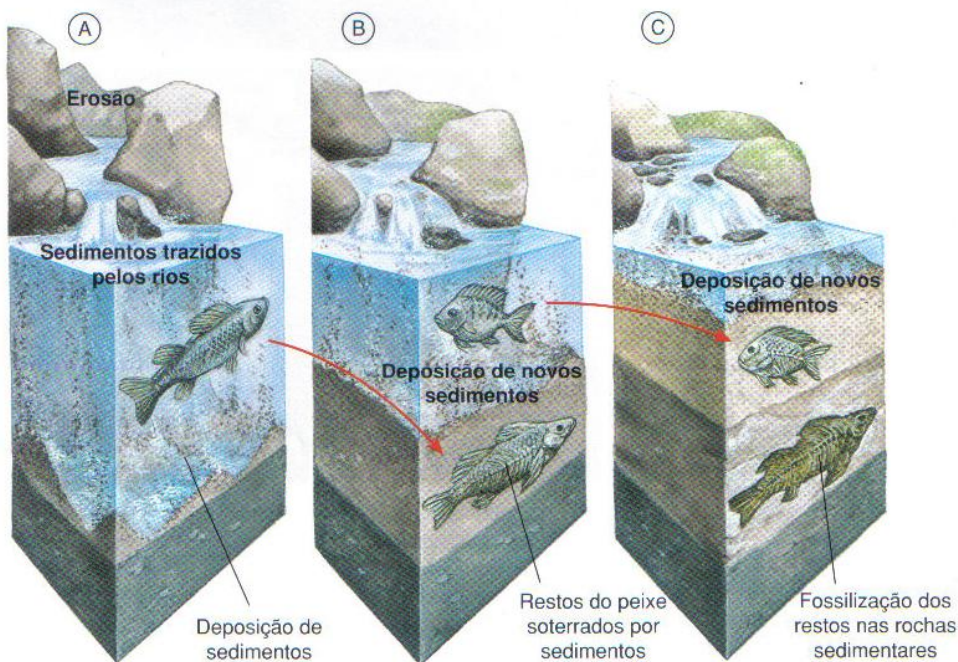



Figura 9.9 • Formação de um fóssil em um estuário de rio. Os sedimentos trazidos pelo rio depositam-se sobre um animal morto, preservando-o da decomposição. As rochas sedimentares formam-se em camadas sobrepostas, de modo que os fósseis encontrados em camadas mais profundas são mais antigos que os das camadas mais superficiais.

QUADRO 9.1 • Estimando a idade dos fósseis

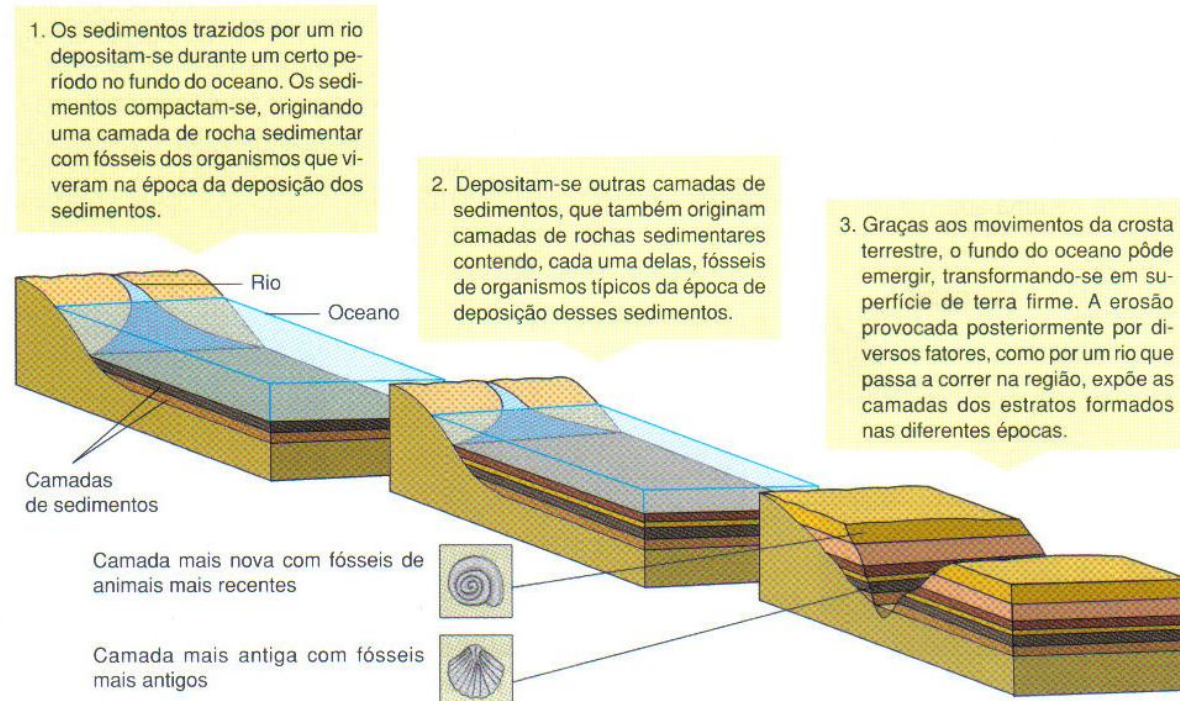
Datação relativa

Um dos grandes desafios dos geólogos e paleontólogos foi encontrar métodos de determinar a idade de uma rocha ou de um fóssil, isto é, saber há quanto tempo eles se formaram. O primeiro método bem-sucedido, que ficou conhecido como **datação relativa**, foi desenvolvido no século XIX com base nas idéias do geólogo inglês William Smith (1769-1839). Partindo do princípio de que as rochas sedimentares se formaram no fundo dos mares, pela deposição sucessiva de camadas de sedimentos, Smith concluiu que as camadas em posição mais inferior deviam ter se formado antes que as superiores. Com isso passou a ser possível determinar as idades relativas das camadas de rocha, ou seja, saber quais delas são mais antigas e quais mais recentes. **(Fig. 9.10)**

Smith também observou que certos fósseis constituem "marcas registradas" das rochas em que ocorrem. Esses fósseis típicos de certas camadas sedimentares foram denominados **fósseis-guias**. Essa conclusão de Smith revolucionou a prática da Geologia, pois permitiu que rochas de diferentes regiões do mundo pudessem ser comparadas com base nos fósseis-guias nelas contidos. Com isso, os cientistas conseguiram reunir "fragmentos" do documentário fóssil de diversas regiões do planeta e, por meio de sua datação relativa, estabelecer as divisões do tempo geológico (veja no capítulo 12).

Datação radiométrica ou absoluta

Por volta de 1950, a datação dos fósseis e das camadas da Terra tornou-se mais precisa, graças ao desenvolvimento de métodos baseados na análise de certos elementos radioativos. A determinação da idade de fósseis ou rochas, por meio desses métodos, denominada **datação radiométrica**, permite estabelecer com precisão há quanto tempo uma rocha ou um fóssil se formou, sendo um método de **datação absoluta**.

Os métodos de datação radiométrica baseiam-se no fato de os elementos radioativos se desintegrarem, transformando-se em outros elementos químicos, segundo taxas constantes, características para cada tipo de elemento. Assim, conhecendo-se a quantidade de um dado elemento radioativo que se desintegrou em uma rocha ou em um fóssil, pode-se determinar a idade destes últimos. Vejamos como isso é possível. →

▲ **Figura 9.10** • Representação esquemática da formação de rochas sedimentares e de fósseis em diferentes períodos de tempo. Cada estrato, ou camada, representa uma etapa particular da história da Terra e é caracterizado por fósseis (fósseis-guias) de certos organismos que viveram na época correspondente.

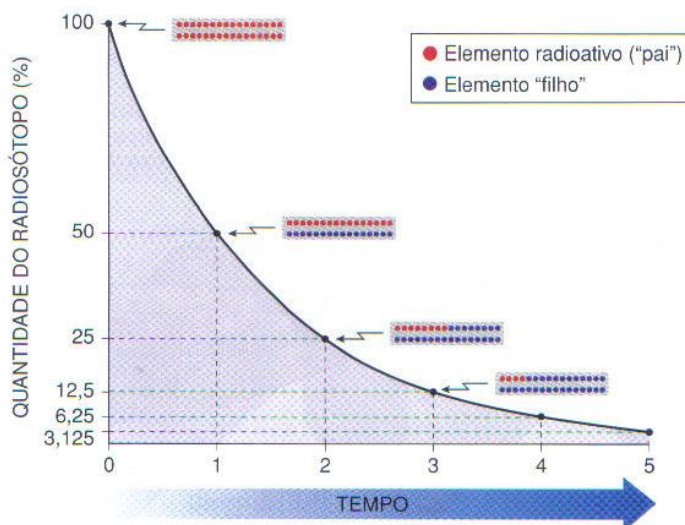
Sabe-se que diversos elementos químicos apresentam um ou mais **isótopos radioativos**, que são variações do elemento quanto ao seu número de massa (relembre esses conceitos no capítulo 3 do volume 1). Por exemplo, a forma predominante dos átomos de carbono (C) na Terra é o isótopo carbono-12 (^{12}C) com 6 prótons e 6 nêutrons no núcleo, totalizando número de massa 12. Uma pequena porcentagem dos átomos de carbono, entretanto, encontra-se na forma do isótopo carbono-14 (**^{14}C**) com 6 prótons e 8 nêutrons (número de massa 14), o qual é radioativo. Os isótopos radioativos são instáveis: os núcleos de seus átomos emitem partículas e radiações eletromagnéticas de alta energia, transformando-se em isótopos do mesmo elemento ou de outros elementos químicos, fenômeno conhecido como **decaimento radioativo**. Por exemplo, o decaimento do ^{14}C leva à formação do ^{14}N, isto é, o isótopo radioativo do carbono-14 transforma-se no isótopo do nitrogênio-14, com 7 prótons e 7 nêutrons (número de massa 14), que não é radioativo.

O decaimento radioativo pode ser utilizado como "relógio geológico" porque ocorre segundo uma taxa constante, denominada meia-vida do elemento. **Meia-vida** de um radioisótopo é definida como o período de tempo em que metade dos átomos desse radioisótopo, presentes em uma amostra, sofre decaimento radioativo. A meia-vida varia de isótopo para isótopo; pode ser de milionésimos de segundo para alguns, até milhões de anos para outros. Por exemplo, a vida-média do ^{14}C é de 5.730 anos, significando que, a cada período de 5.730 anos, metade dos átomos de ^{14}C em uma amostra decai para ^{14}N. Assim, se partíssemos de uma amostra com 1.000 átomos de ^{14}C, após 5.730 anos teríamos 500 átomos de ^{14}C e 500 de ^{14}N; passados mais 5.730 anos, teríamos 250 átomos de ^{14}C e 750 de ^{14}N, e assim por diante. A meia-vida do isótopo ^{235}U do urânio é de 700 milhões de anos e a do isótopo ^{40}K do potássio é 1,3 bilhão de anos. **(Fig. 9.11)**

Datação pelo carbono-14

O conhecimento da meia-vida de isótopos radioativos presentes em fósseis ou nas rochas sedimentares que os contêm permite determinar suas idades com precisão. Se soubermos quanto de ^{14}C tem um animal ao morrer, poderemos calcular quanto tempo transcorreu desde sua morte pela medição do ^{14}C radioativo que restou no fóssil. Por exemplo, se um fóssil apresenta 1/16 do ^{14}C que existia no organismo quando vivo, pode-se concluir que sua morte ocorreu cerca de 23 mil anos atrás. Mas, como podemos determinar quanto de ^{14}C o organismo possuía ao morrer?

A proporção entre as quantidades de ^{12}C e de ^{14}C na atmosfera mantém-se relativamente constante ao longo do tempo, pois, apesar do decaimento natural do ^{14}C, esse isótopo está sempre se formando nas camadas altas da atmosfera graças à transformação de ^{14}N, pelo bombardeamento de raios cósmicos. Nesse processo, um átomo de ^{14}N (7 prótons e 7 nêutrons) absorve radiação cósmica e tem um de seus prótons transformado em um nêutron, originando um átomo de ^{14}C (6 prótons e 8 nêutrons).

Como os organismos fotossintetizantes não discriminam entre os dois isótopos de carbono, todo ser vivo apresenta em suas moléculas orgânicas uma proporção desses isótopos, correspondente à existente na →

◄ **Figura 9.11** • Gráfico que representa o decaimento radioativo de um isótopo a um outro elemento. No gráfico, a cada unidade de tempo (vida-média do elemento radioativo) ocorre decaimento de 50% do isótopo na amostra. A meia-vida varia de acordo com o tipo de isótopo; para o ^{14}C, por exemplo, é de 5.730 anos.

atmosfera. Ao morrer, um ser vivo deixa de incorporar novos átomos de carbono em sua matéria orgânica, e os isótopos radioativos que possui vão gradativamente desaparecendo, em decorrência do decaimento natural. Assim, a medição da quantidade residual do ^{14}C nas moléculas orgânicas presentes em um fóssil, em relação à quantidade estimada de ^{14}C quando o organismo era vivo, possibilita sua datação.

Como a meia-vida do carbono-14 é relativamente curta, a datação por esse isótopo é possível apenas para fósseis com menos de 50 mil anos. Para datar fósseis mais antigos, são utilizados isótopos com meia-vida mais longa, presentes nas rochas onde o fóssil se encontra. Nesse caso, em vez de datar diretamente o fóssil, estima-se a idade das rochas que o contêm. **(Fig. 9.12)**

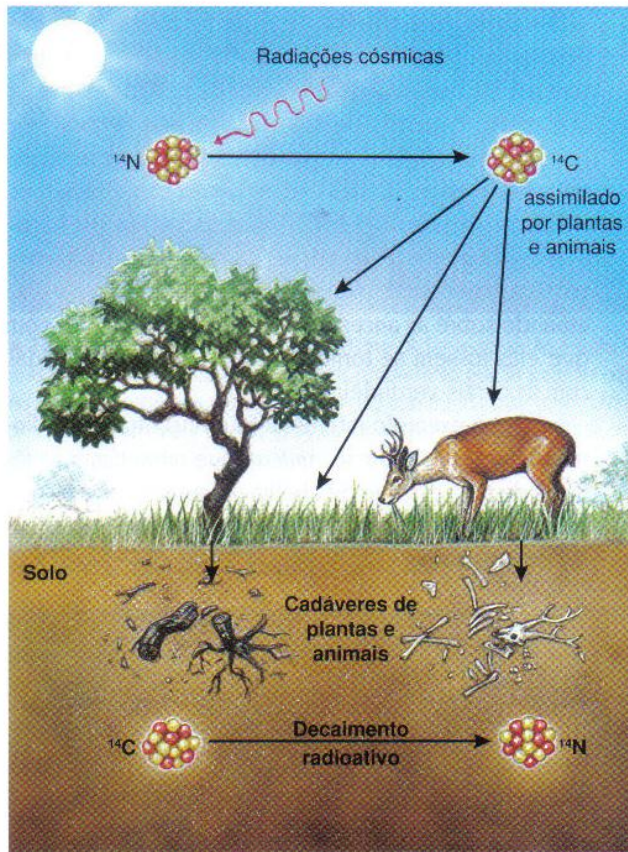
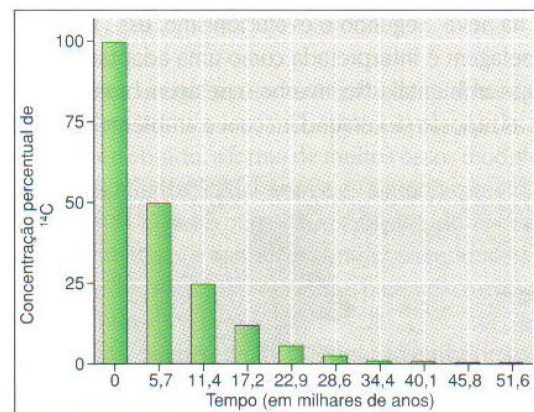
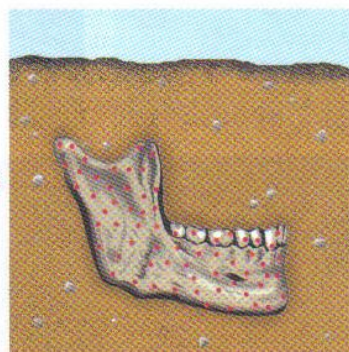
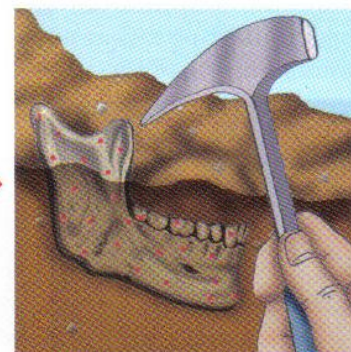



Figura 9.12 • À esquerda, representação esquemática da formação de ^{14}C a partir de ^{14}N bombardeado por raios cósmicos. O ^{14}C é assimilado pelos seres vivos. Após a morte, o ^{14}C presente em seus restos decai a ^{14}N. Medidas do ^{14}C residual permitem estimar há quanto tempo o organismo morreu. O gráfico mostra o decaimento do ^{14}C, cuja meia-vida é de 5.730 anos.

Assim que um organismo morre, a concentração de ^{14}C em suas moléculas orgânicas é equivalente à presente na atmosfera.

À medida que o tempo passa, a concentração de ^{14}C diminui, pois átomos desse isótopo se desintegram, transformando-se em ^{14}N.

Quando o fóssil ainda contém substâncias orgânicas, como a proteína colágeno dos ossos, por exemplo, sua idade absoluta pode ser determinada por meio da concentração de átomos de ^{14}C nele contidos.

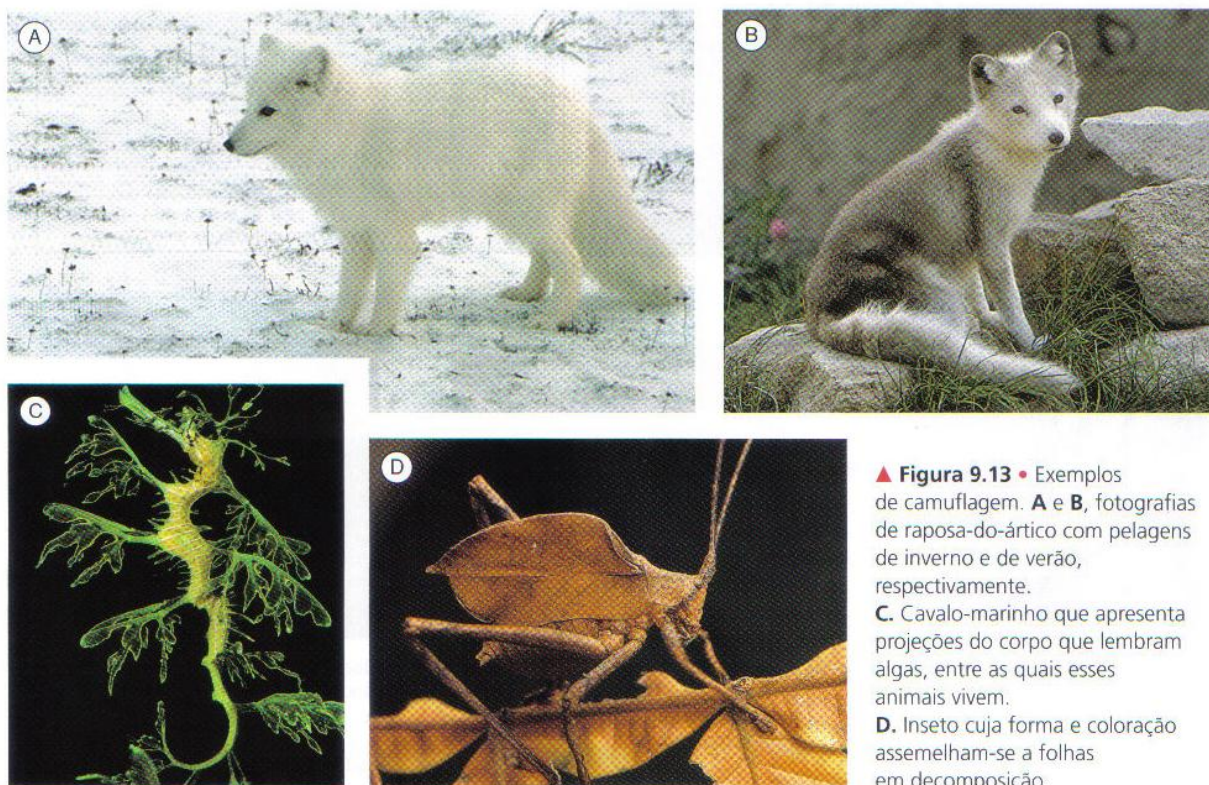
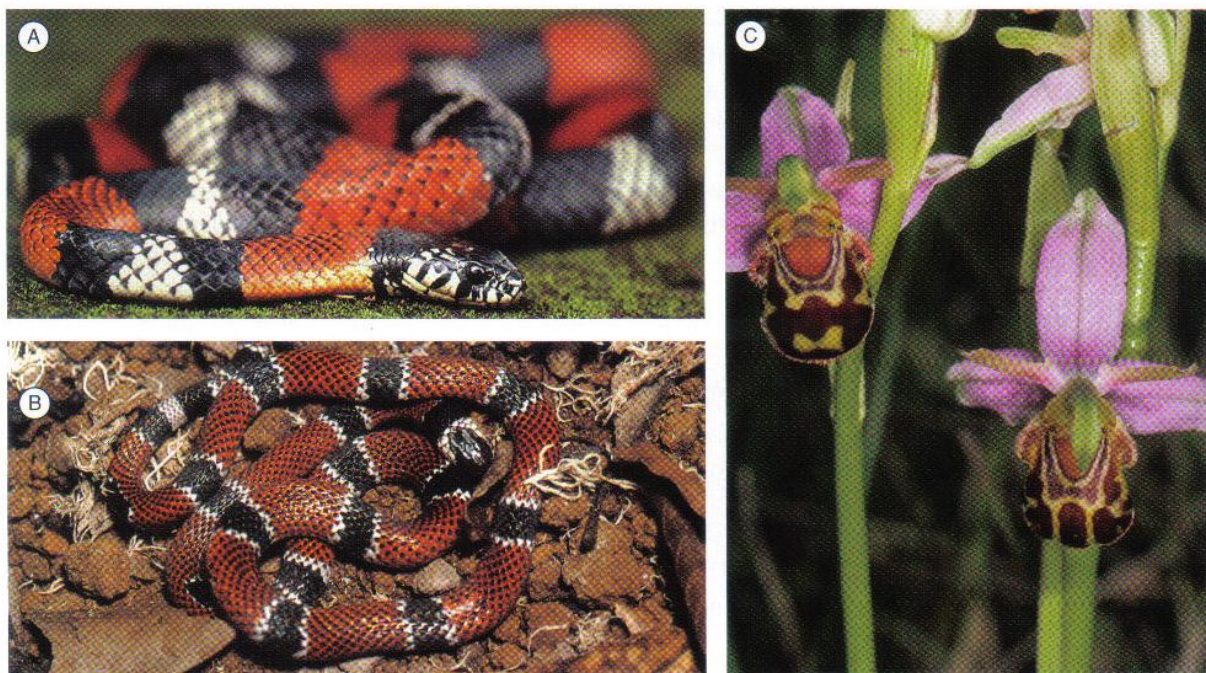
Adaptação

Adaptação é o ajustamento que todos os organismos apresentam em relação ao ambiente em que vivem. Basta observar qualquer ser vivo com atenção para constatar que muitos aspectos de sua anatomia, de sua fisiologia e de seu comportamento estão altamente ajustados ao seu modo de vida. O evolucionismo explica a adaptação como resultado do fato de os indivíduos portadores de características adaptativas terem mais chance de sobreviver e de deixar descendentes, aos quais transmitem suas características. Dessa forma, essas características vão se modificando ao longo das gerações e, pouco a pouco, se tornam mais adequadas e eficientes; isso nos dá, após bilhões de anos, a falsa impressão de que foram intencionalmente projetadas com um fim específico.

Um exemplo marcante de adaptação é a **camuflagem**, em que uma espécie desenvolveu, ao longo de sua evolução, uma ou mais características corporais que se assemelham ao ambiente, dificultando sua localização por espécies com as quais convive. As raposas-do-ártico, por exemplo, têm pelagem totalmente branca durante o inverno, quando o ambiente está coberto pela neve, e pelagem acinzentada nas outras épocas do ano, quando não há neve. Segundo o evolucionismo, essa troca anual de pelagem é interpretada como uma adaptação às mudanças ambientais. No inverno, a pelagem branca permite que as raposas se confundam com o ambiente, tornando-se menos visíveis, o que facilita sua aproximação das presas e sua ocultação de predadores. Quando não há neve, a pelagem cinzenta confere maior camuflagem. **(Fig. 9.13)**

Outro exemplo marcante de adaptação é o **mimetismo**. Nesse caso, duas espécies diferentes compartilham alguma semelhança que é reconhecida por outras espécies, de modo que a semelhança compartilhada confere vantagens para uma ou para ambas as **espécies miméticas**.

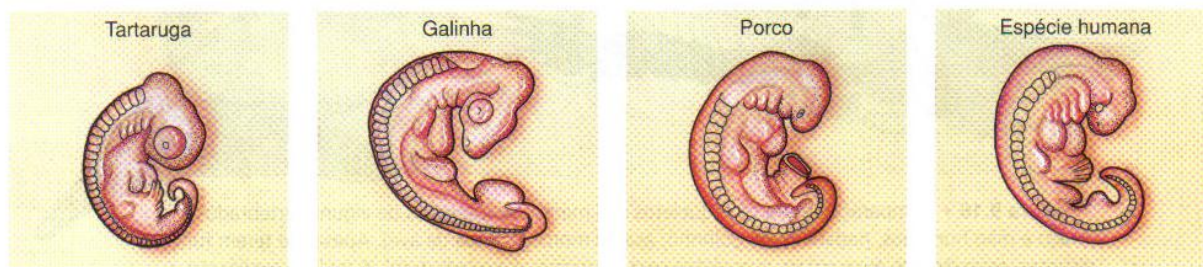
Um exemplo de mimetismo é encontrado nas serpentes popularmente conhecidas como cobras-corais. A espécie *Micrurus coralinus*, uma coral-verdadeira, é altamente peçonhenta, enquanto *Erithrolampus aesculapi*, uma falsa-coral, não apresenta dentes injetores de peçonha e não oferece grande perigo a eventuais atacantes. O padrão de coloração dessas serpentes é bastante semelhante, apesar de elas pertencerem a famílias diferentes. Explica-se esse fato como resultado da adaptação da falsa-coral, cujos ancestrais provavelmente se beneficiavam por ser parecidos com as corais-verdadeiras, com as quais conviviam. A seleção natural, atuando sobre as ancestrais das falsas-corais, fez com que elas fossem se tornando cada vez mais parecidas com as corais-verdadeiras.

Outro exemplo interessante é encontrado nas flores da orquídea *Ophrys apifera*, que mimetizam as fêmeas de uma espécie de abelha. A imitação leva os machos a tentar copular com as flores, atuando como agentes polinizadores. **(Fig. 9.14)**

▲ **Figura 9.13** • Exemplos de camuflagem. **A** e **B**, fotografias de raposa-do-ártico com pelagens de inverno e de verão, respectivamente.
C. Cavalo-marinho que apresenta projeções do corpo que lembram algas, entre as quais esses animais vivem.
D. Inseto cuja forma e coloração assemelham-se a folhas em decomposição.

▲ **Figura 9.14** • Exemplos de mimetismo. A falsa-coral (**A**) é uma serpente pouco peçonhenta, mas que mantém afastados possíveis predadores por se parecer com a coral-verdadeira (**B**). As flores da orquídea *Ophrys apifera* (**C**) assemelham-se a uma fêmea de abelha, produzindo um odor que atrai os zangões. Ao tentarem copular com as flores, os zangões transportam o pólen, promovendo a reprodução da orquídea.

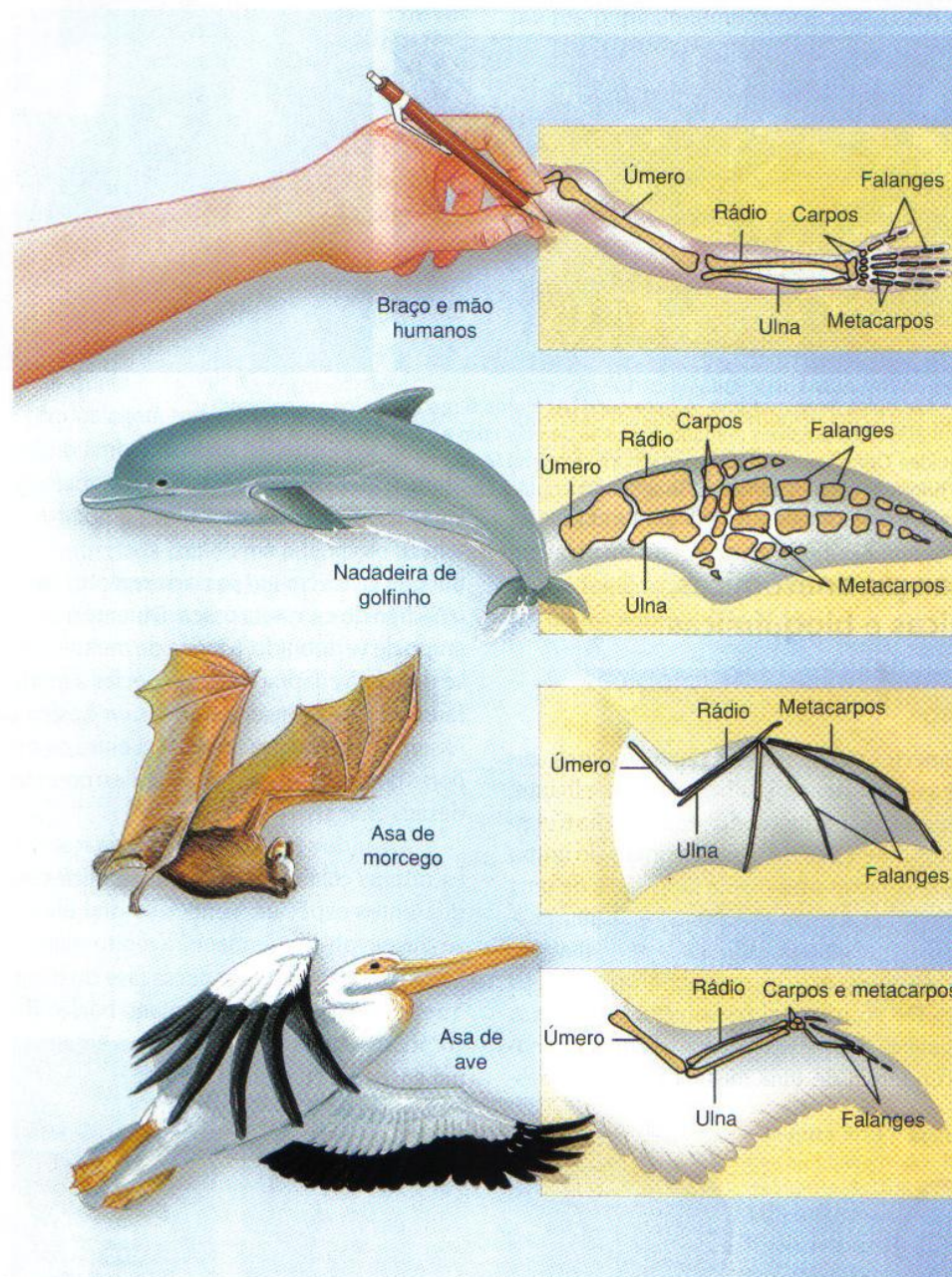
Semelhanças anatômicas, fisiológicas e bioquímicas

Evidências anatômicas e fisiológicas da evolução

Certas espécies de seres vivos têm estruturas corporais com organização anatômica bastante semelhante, apesar de desempenharem funções diferentes. São exemplos os membros anteriores de alguns animais do grupo dos vertebrados, como as asas de um morcego e de uma ave, as nadadeiras de um golfinho e os braços de uma pessoa. Esses órgãos apresentam esqueletos semelhantes, sendo possível estabelecer a correspondência entre seus diversos ossos. De acordo com o evolucionismo, essas semelhanças devem-se ao fato de todos os animais mencionados descenderem de uma mesma espécie ancestral que viveu em um passado remoto, da qual herdaram o padrão de estrutura óssea. Durante a evolução de cada grupo de vertebrado, a forma de muitos ossos modificou-se devido à adaptação das espécies a modos de vida diferentes, mas conservou o ***design*** básico do ancestral. Assim, a semelhança anatômica entre os membros anteriores dos vertebrados testemunha o parentesco evolutivo desses animais.

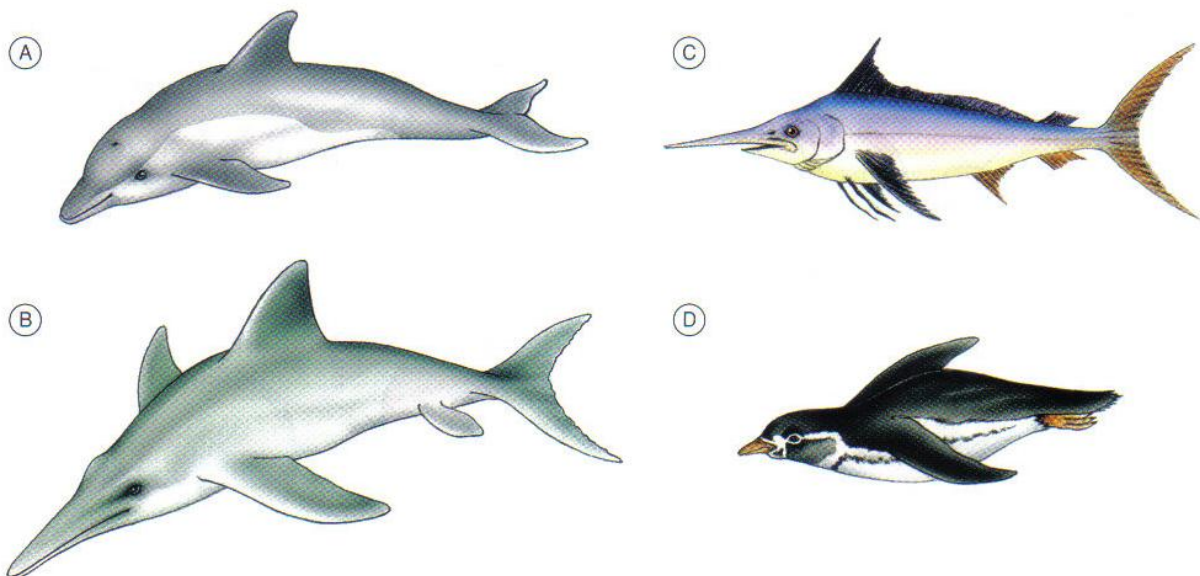
Quando se acompanha a formação embrionária de estruturas com organização anatômica semelhante, em diferentes espécies, verifica-se que elas se originam e se desenvolvem de maneira muito parecida. Isso é explicado pelo fato de ser nessa fase do desenvolvimento que ocorre a definição do plano básico de organização corporal, que os organismos aparentados herdaram de um ancestral comum. **(Fig. 9.15)**

▲ **Figura 9.15** • A grande semelhança entre os embriões dos diversos tipos de vertebrado é uma forte evidência de que eles descendem de um mesmo ancestral (os embriões não estão representados em escala).

Estruturas corporais ou órgãos que se desenvolvem de modo semelhante em embriões de determinadas espécies, como os membros anteriores de grande parte dos animais vertebrados, são denominados **órgãos homólogos**. **(Fig. 9.16)**.

Apesar da origem embrionária semelhante, órgãos homólogos podem desempenhar funções diferentes, como é o caso das asas dos morcegos, adaptadas ao vôo, e das nadadeiras peitorais dos golfinhos, adaptadas à natação. Por outro lado, determinados órgãos que desempenham funções semelhantes em certas espécies podem ter origens embrionárias completamente diferentes. É o caso das asas de aves e de insetos que, apesar de estarem adaptadas à função de voar, têm origens embrionárias totalmente distintas. Nesse caso, fala-se em **órgãos análogos**. **(Fig. 9.17)**

▲ **Figura 9.16** • Comparação entre os esqueletos dos membros anteriores de alguns vertebrados (braço e mão humanos, nadadeira de golfinho, asa de morcego e asa de ave). Apesar de terem funções distintas, esses órgãos apresentam esqueletos com o mesmo plano estrutural. A melhor explicação para essa semelhança de organização óssea é que esses animais descendem de um ancestral comum, de quem herdaram o *design* que compartilham.

▲ **Figura 9.17** • As asas dos insetos e as das aves são órgãos análogos: têm mesma função, mas origem embrionária e plano estrutural totalmente diferentes. A asa de uma ave é um membro composto de ossos, músculos, pele, nervos etc., enquanto a asa de um inseto é uma projeção do exoesqueleto de quitina que recobre o corpo do animal.

Como já mencionamos, a teoria da evolução explica a semelhança entre órgãos homólogos pelo fato de eles terem sido herdados do ancestral comum das espécies que os possuem. As funções diferentes que órgãos homólogos podem ter, por sua vez, são explicadas pelo fato de as espécies terem se diversificado ao longo da evolução, ou seja, cada uma ter desenvolvido um modo de vida particular. Assim, devido à adaptação, órgãos semelhantes quanto à origem podem ter se diversificado quanto à função. Essa diversificação de órgãos homólogos, decorrente da adaptação a modos de vida diferentes, é denominada **divergência evolutiva**.

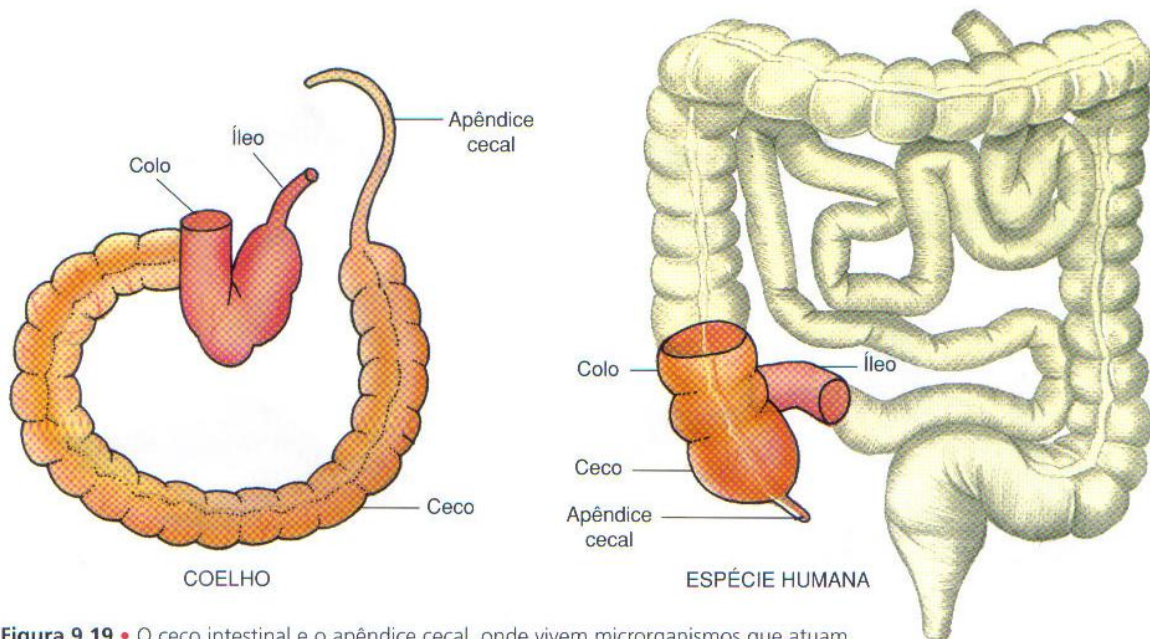
Órgãos análogos, por outro lado, são estruturas que apareceram de forma independente em diferentes grupos de organismos, constituindo adaptações a modos de vida semelhantes. Por exemplo, asas são estruturas adaptadas para voar e, por isso, apresentam superfície ampla, o que permite obter sustentação no ar. Esse princípio estrutural está presente tanto nas asas de insetos como nas asas dos morcegos, que têm origens embrionárias totalmente distintas. Assim, durante a evolução, a adaptação pode levar organismos pouco aparentados a desenvolver estruturas e formas corporais semelhantes, o que é denominado **convergência evolutiva**. **(Fig. 9.18)**

▲ **Figura 9.18** • Exemplo de convergência evolutiva. A forma hidrodinâmica do corpo desenvolveu-se independentemente em diferentes espécies de vertebrado graças à sua adaptação ao modo de vida aquático. **A.** Golfinho. **B.** Ictiossauro (um réptil extinto). **C.** Peixe ósseo. **D.** Pingüim.

Muitos organismos apresentam **órgãos vestigiais**, estruturas atrofiadas e sem função evidente, como é o caso do apêndice ileocecal humano, pequena estrutura em forma de dedo presente na junção entre o intestino delgado e o intestino grosso. A presença do apêndice em nossa espécie é explicada pelo fato de esse órgão ter sido importante em nossos ancestrais remotos, que tinham dieta predominantemente herbívora; neles, o ceco (porção inicial do intestino grosso, onde se abre o intestino delgado) e o apêndice abrigavam microrganismos auxiliares da digestão de celulose. Com o desenvolvimento de outros tipos de dieta, na linhagem que originou nossa espécie, o ceco e o apêndice ileocecal deixaram de ser vantajosos e regrediram durante o processo evolutivo, restando apenas como vestígios de sua existência passada. **(Fig. 9.19)**

A pequena "cauda" das aves (popularmente chamada coranchim), formada por vários ossos, é também considerada uma estrutura vestigial. A presença de tantos ossos em uma cauda tão pequena parece ser o resquício de uma longa cauda, presente nos répteis ancestrais dos quais as aves de hoje se originaram.

Evidências moleculares da evolução

As modernas técnicas de análise bioquímica têm revelado grande semelhança entre a estrutura molecular de diversos organismos. Por exemplo, as proteínas são os constituintes fundamentais de qualquer ser vivo, e todas as formas de vida atuais têm proteínas formadas pelos mesmos 20 tipos de aminoácido. Será que essa semelhança é apenas uma coincidência? Os biólogos evolucionistas acreditam que não; segundo eles, os seres vivos têm proteínas semelhantes porque herdaram de seus ancestrais o sistema de codificação genética, para produzi-las, basicamente o mesmo em todas as formas atuais de vida do planeta.

A análise comparativa de proteínas e de ácidos nucléicos tem confirmado as semelhanças anatômicas e embrionárias já verificadas entre certos organismos. Um exemplo é a comparação da seqüência de aminoácidos do citocromo *c*, uma proteína com pouco mais de uma centena de aminoácidos, presente na maioria das espécies. Essa proteína é exatamente a mesma na espécie humana e nos chimpanzés. Quando se compara o citocromo *c* humano com o das baleias, por exemplo, nota-se que eles diferem quanto à posição de 8 aminoácidos. Essa diferença aumenta quando se compara o citocromo *c* humano com o das aves (diferença quanto à posição de 13 aminoácidos), com o dos peixes (diferença quanto à posição de 20 aminoácidos) e com o dos fungos (diferença quanto à posição de 41 aminoácidos). De acordo com o evolucionismo, essas diferenças refletem nosso maior grau de parentesco com os chimpanzés, com os quais compartilhamos um ancestral há muito menos tempo do que com as baleias; e assim por diante.

▲ **Figura 9.19** • O ceco intestinal e o apêndice cecal, onde vivem microrganismos que atuam na digestão da celulose, são mais desenvolvidos em animais herbívoros. A teoria da evolução admite que essas diferenças na estrutura do intestino resultam da adaptação a diferentes tipos de alimentação.

LEITURA

A QUESTÃO DO CRIACIONISMO

Os antievolucionistas defendem suas idéias apesar da monumental quantidade de evidências contrárias

Enquanto todas as ciências dão suporte à teoria da evolução, os antievolucionistas simplesmente a ignoram, pois eles se guiam somente por suas conclusões, concebidas independentemente dos fatos

No começo pensei que os antievolucionistas eram apenas pessoas confusas, que não entendiam a estrutura do conhecimento e que não conseguiam diferenciar dados derivados de um sistema teológico dos obtidos através de um sistema científico. Fui ingênuo a ponto de acreditar que a lógica, a razão e os fatos eram suficientes para convencer pessoas cientificamente desinformadas, mas logo abandonei a idéia de estar lidando com um grupo de inocentes. Descobri que os antievolucionistas eram cegos pela ignorância, da qual se orgulhavam, e refratários à recepção de idéias contrárias às suas.

Enquanto todas as ciências dão suporte à teoria da evolução, os antievolucionistas simplesmente a ignoram, pois eles se guiam somente por suas conclusões, concebidas independentemente dos fatos: a Terra não tem mais que 10 mil anos de idade, todos os fósseis foram produzidos em conseqüência do dilúvio, as espécies são imutáveis e os organismos não têm relações de parentesco. Os antievolucionistas defendem essas idéias apesar da monumental quantidade de evidências contrárias. Eles não são apenas presunçosos ignorantes, mas possuem ainda uma infinita capacidade para desconsiderar a abrangência dos dados científicos sobre os quais se apóia a teoria da evolução. Mais do que ensinar suas crenças, o objetivo dos antievolucionistas é eliminar a teoria da evolução, não apenas das escolas, mas também da mente das pessoas.

A ciência não mudará a cabeça dos antievolucionistas, assim como os dados de realidade sobre a redondeza da Terra não mudaram a mente dos membros da Sociedade da Terra Plana[1]. Podemos e devemos tolerar as excentricidades, mas não se pode permitir que, nas salas de aula, se ensinem falsidades e irrealidades, às vezes disfarçadas de ciência.

---

[1] Outras informações sobre a Sociedade da Terra Plana podem ser encontradas no endereço eletrônico *www.flat-earth.org*

Praticamente todas as principais organizações científicas e educacionais dos Estados Unidos estão se opondo à decisão de considerar o criacionismo uma ciência

Vinte anos atrás descobri que era muito difícil despertar em meus colegas cientistas uma reação contra o movimento antievolucionista. A maioria respondia às minhas chamadas com dois tipos de reações: apatia, por acharem que o antievolucionismo não poderia influenciar seus interesses científicos, e incredulidade, por acharem que eu estava fazendo tempestade em copo d'água. De acordo com meus colegas, ninguém daria crédito a idéias como a imutabilidade das espécies ou a juventude da Terra.

Entretanto, essa atitude mudou quando a comunidade científica tomou conhecimento do sucesso alcançado pelo movimento antievolucionista. O fato de a legislação (norte-americana) ter concedido ao ensino da versão bíblica da criação tempo igual àquele concedido ao ensino da teoria de evolução fez a comunidade científica reagir. Praticamente todas as principais organizações científicas e educacionais dos Estados Unidos estão se opondo à decisão de considerar o criacionismo uma ciência e conceder-lhe tempo igual ao destinado ao ensino da evolução.

• **Fonte**: William V. Mayer, The arrogance of ignorance — Ignoring the ubiquitous. *American Zoologist*, vol. 24, 1984, p. 423-431. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

9.1 O conceito de evolução biológica

1. Conceitue, em linhas gerais, evolução biológica.

9.2 O pensamento evolucionista

2. Compare sucintamente os pensamentos criacionista e evolucionista.

3. Quais são os princípios do lamarckismo?

4. Quais são as falhas e os méritos das idéias de Lamarck?

5. Explique resumidamente as idéias que compõem o darwinismo. (Sugestão: reúna as conclusões 1, 2 e 3 do texto, resumindo-as.)

6. Qual foi a explicação de Darwin para a existência de fauna e flora semelhantes em ilhas próximas, como as que ele observou em Galápagos?

7. Como as idéias de Malthus influenciaram Darwin na elaboração da teoria da seleção natural?

8. Em que aspecto os estudos de Darwin sobre seleção artificial ajudaram o desenvolvimento da teoria da seleção natural?

9.3 Evidências da evolução biológica

9. O que são fósseis e por que eles constituem evidência da evolução?

10. Por que os fósseis são relativamente raros? Quais são as condições para que eles se formem?

11. Cite, explicando brevemente, alguns tipos de fósseis.

Quadro 9.1 Estimando a idade dos fósseis

12. O que é decaimento radioativo de um isótopo? E meia-vida? Dê exemplos.

13. Quais são os princípios empregados na datação radiométrica?

14. Conceitue adaptação biológica.

15. Como a teoria evolucionista explica a adaptação?

16. O que é camuflagem? E mimetismo? Exemplifique.

17. Por que a anatomia comparada fornece evidências de que ocorreu evolução?

18. Conceitue e exemplifique:
a) Órgãos homólogos.
b) Órgãos análogos.
c) Órgãos vestigiais.

19. O que é convergência evolutiva?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 20 a 22.

a) Criacionismo.
b) Esoterismo.
c) Evolucionismo.
d) Paganismo.

20. Algumas tribos indígenas brasileiras acreditavam que os primeiros seres humanos foram criados por uma entidade divina a partir da massa de milho. Em que corrente de pensamento essas idéias podem ser classificadas?

21. O arcebispo irlandês James Ussher (1581-1656), com base em seus estudos bíblicos, calculou que Adão e Eva se originaram por obra divina no ano de 4004 a.C. Que corrente de pensamento melhor corresponderia à adotada pelo bispo?

22. "Os morcegos apresentam várias adaptações semelhantes às desenvolvidas pelas aves para diminuir o peso do corpo. Os ossos de sua cauda diminuíram até se tornarem finos como palha ou desapareceram totalmente." Essa descrição, extraída do livro *A vida na Terra*, de David Attenborough, seria mais bem enquadrada em que corrente de pensamento?

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 23 a 26.

a) Adaptação.
b) Camuflagem.
c) Mimetismo.
d) Seleção artificial.
e) Seleção sexual.

23. O panda-gigante tem um sexto dedo — uma espécie de "polegar" — que evoluiu de um dos ossos do punho; com isso esses animais podem segurar com mais eficiência os ramos de bambu de que se alimentam. Como esse fenômeno pode ser classificado, sob o ponto de vista do evolucionismo?

24. O cuco europeu, como o chupim brasileiro, põe seus ovos no ninho de outras aves, deixando a elas os cuidados de chocar e criar seus filhotes. Os cucos são geralmente bem maiores que os representantes das espécies que chocam seus ovos. No entanto, os ovos dos cucos são semelhantes aos de seus hospedeiros tanto em tamanho como no padrão de coloração. Como esse fenômeno pode ser classificado, do ponto de vista do evolucionismo?

25. A hemoglobina das lhamas apresenta uma pequena diferença em relação à de outros mamíferos, o que lhe confere maior afinidade pelo gás oxigênio. Essa característica é útil onde as lhamas vivem, no alto dos Andes, em que o o ar é rarefeito. Como esse fenômeno pode ser classificado, do ponto de vista do evolucionismo?

26. Peixes conhecidos como linguados vivem a maior parte do tempo parados sobre a areia do fundo do mar. Sua coloração apresenta o mesmo padrão que a coloração do fundo, e eles passam despercebidos de seus predadores e também de suas presas. Como esse fenômeno pode ser classificado, sob o ponto de vista do evolucionismo?

27. Um dos mais preciosos e importantes sítios paleontológicos, com cerca de meio bilhão de anos, foi descoberto em 1909, no alto das Montanhas Rochosas canadenses, no interior do Parque Nacional de Yoho, próximo à fronteira oriental da Colúmbia Britânica. São impressões na rocha não só de carapaças, mas também das partes moles de diversos tipos de animais invertebrados, o que permite inferir como era sua organização anatômica. Vestígios como esses são exemplos de
a) adaptação.
b) fósseis.
c) mimetismo.
d) seleção natural.

28. A forma hidrodinâmica dos corpos de um golfinho, de um ictiossauro (réptil aquático extinto), de um atum e de um pingüim desenvolveu-se independentemente nesses animais como adaptação ao ambiente aquático. Trata-se, portanto, de um caso de
a) convergência evolutiva.
b) divergência evolutiva.
c) mimetismo.
d) seleção artificial.

29. Os olhos de um vertebrado e de um polvo funcionam de maneira muito semelhante, apesar de terem origens embrionárias totalmente diferentes. Eles são, portanto, exemplo de
a) mimetismo.
b) órgãos análogos.
c) órgãos homólogos.
d) órgãos vestigiais.

30. As semelhanças estruturais e funcionais entre os olhos de um vertebrado e de um polvo podem ser atribuídas ao fenômeno denominado
a) convergência evolutiva.
b) divergência evolutiva.
c) mimetismo.
d) seleção artificial.
e) seleção sexual.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 31 e 32.
a) Órgão análogo.
b) Órgão convergente.
c) Órgão divergente.
d) Órgão vestigial.

31. Os ancestrais das aves tinham caudas longas, sustentadas por inúmeras vértebras. Nas aves atuais, a cauda está reduzida ao coranchim, que mantém ainda inúmeros pequenos ossos em sua estrutura, quando um único osso seria suficiente. O que representa o coranchim das aves, no contexto do evolucionismo?

32. O cóccix presente no final da coluna vertebral humana constitui-se de algumas vértebras originárias da cauda de nossos ancestrais. O que representa o cóccix, no contexto do evolucionismo?

33. Leia o trecho a seguir: "Devido a esta luta, as variações, por mais fracas que sejam e seja qual for a causa de onde provenham, tendem a preservar os indivíduos de uma espécie e comumente se transmitem à descendência logo que sejam úteis a esses indivíduos nas suas relações por demais complexas com os outros seres organizados e com as condições físicas da vida. Os descendentes terão, por si mesmos, em virtude disso, maior probabilidade de sobrevida; porque, dos indivíduos nascidos periodicamente, um pequeno número poderá sobreviver". O trecho ilustra um pensamento
a) criacionista.
b) darwinista.
c) lamarckista.
d) malthusiano.

As frases a seguir referem-se às questões de 34 a 36.
I. A adaptação resulta do sucesso reprodutivo diferencial.
II. A adaptação resulta da interação dos organismos com o ambiente.
III. A adaptação resulta do uso e do desuso de estruturas anatômicas.
IV. O documentário fóssil sustenta a idéia de que as espécies são fixas.

34. A teoria evolucionista de Darwin admite as idéias expressas em
a) I e II.
b) I e III.
c) II e III.
d) III e IV.

35. A teoria evolucionista de Lamarck admite as idéias expressas em
a) I e II.
b) I e III.
c) II e III.
d) III e IV.

36. Uma idéia comum ao darwinismo e ao lamarckismo está expressa em
a) I.
b) II.
c) III.
d) IV.

QUESTÕES DISCURSIVAS

37. Como se explicam as diferenças entre animais e plantas domésticos e seus ancestrais selvagens?

38. Algumas ilhas do arquipélago de Galápagos são habitadas por iguanas, um tipo de lagarto de terra firme que aprecia comer flores de cactos. Nas ilhas onde não existem esses animais, os cactos são rasteiros e suas flores ficam próximas ao chão. Nas ilhas onde vivem as iguanas, porém, os cactos são arborescentes e suas flores ficam bem distantes do chão. Como a seleção natural permite explicar o fato de as plantas de cactos serem arborescentes nas ilhas onde existem iguanas e rasteiras nas ilhas onde não existem esses lagartos?

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

39. (Uece) Os órgãos que guardam relação de homologia entre si são
a) braço humano e asa de gavião
b) asa de coruja e de borboleta
c) nadadeira de tubarão e de golfinho
d) pata de cachorro e nadadeira de tubarão

40. (Unesp) A estrutura dos ossos sendo a mesma na mão de um homem, na asa de um morcego, na nadadeira de um golfinho e na pata de um cavalo — o mesmo número de vértebras no pescoço da girafa e no pescoço do elefante —, e inúmeros outros fatos desse tipo, explicam-se na teoria da descendência pelas pequenas e lentas modificações sucessivas.

(Charles Darwin, *A origem das espécies*. 1859.)

No trecho, Darwin apresenta como evidências da evolução
a) os órgãos homólogos.
b) os órgãos análogos.
c) os órgãos vestigiais.
d) a seleção natural.
e) a mutação.

41. (UFC-CE) O processo de evolução natural das espécies produz nos seres vivos estruturas homólogas e análogas. Com relação a essas estruturas, assinale a alternativa correta.
a) São ditas homólogas quando apresentam mesmas funções e origem.
b) São ditas análogas quando apresentam funções e origens diferentes.
c) São ditas homólogas quando apresentam mesmas funções e origens diferentes.
d) São ditas homólogas quando apresentam funções diferentes mas as mesmas origens.

42. (FGV-SP) Considerando os princípios abaixo:
I. Variação de características.
II. Lei do uso e desuso.
III. Alteração gênica.
IV. Sobrevivência dos mais aptos.
V. Seleção natural.
Darwin, em sua teoria da evolução das espécies, considerou a seguinte seqüência
a) II, III, V
b) I, IV, III
c) I, IV, V
d) V, III, IV
e) IV, V, II

43. (UFAL) A lebre do Ártico muda sua pelagem duas vezes por ano. Quando o inverno se aproxima, perde os pêlos e produz outros que são
a) cinzentos, protegendo-a de seus predadores.
b) brancos, protegendo-a de seus predadores.
c) pretos, protegendo-a de seus predadores.
d) cinzentos, tornando-a bem visível no ambiente.
e) brancos, tornando-a bem visível no ambiente.

44. (UNB) Os homens sempre se espantaram diante das belezas naturais. Poetas, pintores, cada um a seu modo, tentam retratar a profunda beleza do mundo dos seres vivos. Uma das coisas que mais atraem os olhos é a imensa variedade de formas e cores. Além de encanto para os olhos, essas cores muitas vezes estão ligadas a funções biológicas e foram sendo selecionadas ao longo da evolução. A esse respeito, julgue os itens abaixo.
(1) Flores de cores vivas atraem insetos e pássaros, que ajudam na polinização.
(2) O urso branco e a onça pintada são exemplos de animais cujas cores fazem com que sejam menos visíveis por possíveis presas.
(3) Frutos de cores vivas espantam pássaros que poderiam comê-los.
(4) As plantas de folhas vermelhas não realizam fotossíntese.
(5) As penas multicoloridas das aves muitas vezes têm papel significativo nos seus rituais de acasalamento.

45. (PUCSP) As semelhanças encontradas entre dois animais aquáticos como o golfinho e o tubarão indicam evolução
a) convergente, pois esses animais são filogeneticamente distantes e apresentam adaptações semelhantes.
b) divergente, pois esses animais apresentam homologias indicadoras de parentesco.
c) convergente, pois esses animais apresentam homologias indicadoras de parentesco.
d) divergente, pois esses animais apresentam analogias indicadoras de parentesco.
e) convergente, pois esses animais são filogeneticamente próximos e apresentam adaptações semelhantes.

46. (UFSC-Adaptado) O conhecimento do processo evolutivo é fundamental para a compreensão da vida. O estudo de fósseis é uma importante evidência de que a evolução dos organismos ocorreu.

Com relação a esse estudo, é INCORRETO afirmar que
a) fósseis são restos ou vestígios de seres que viveram no passado.
b) os tipos de fósseis encontrados em determinada camada de solo refletem a flora e a fauna existentes no local, por ocasião da formação das rochas.
c) a partir de uma parte do corpo, de uma pegada ou de uma impressão corporal, é possível deduzir o tamanho e a forma dos organismos que as deixaram.
d) o método do carbono 14 auxilia na determinação da idade de um fóssil.
e) não foram encontrados, até o momento, registros fósseis no sul do Brasil.

47. (UFC) "Nenhum dos fatos definidos da seleção orgânica, nenhum órgão especial, nenhuma forma característica ou distintiva, nenhuma peculiaridade do instinto ou do hábito, nenhuma relação entre espécies — nada disso pode existir, a menos que seja, ou tenha sido alguma vez, útil aos indivíduos ou às raças que os possuem".

(Alfred Russel Wallace, 1867)

O texto anterior é uma defesa intransigente do princípio

a) darwinista da seleção natural.
b) lamarckista da herança dos caracteres adquiridos.
c) mendeliano da segregação dos caracteres.
d) darwinista da seleção sexual.
e) lamarckista do uso e do desuso.

48. (FUVEST) Uma idéia comum às teorias da evolução propostas por Darwin e por Lamarck é que a adaptação resulta

a) do sucesso reprodutivo diferencial.
b) de uso e desuso de estruturas anatômicas.
c) da interação entre os organismos e seus ambientes.
d) da manutenção das melhores combinações gênicas.
e) de mutações gênicas induzidas pelo ambiente.

49. (FATEC) Analise o texto abaixo:

"Em todo animal que não tenha ainda se desenvolvido completamente, o uso freqüente e repetido de um órgão qualquer fortalece, pouco a pouco, esse órgão, desenvolve-o, aumenta-o, tornando-o mais forte, com uma força proporcional ao tempo de uso, enquanto o desuso de tal órgão enfraquece-o aos poucos, deteriora-o, diminui progressivamente suas faculdades e acaba por fazê-lo desaparecer."

(Filosofia Zoológica, 1809)

O texto acima deve ser atribuído a

a) Darwin, para explicar a seleção natural.
b) Lamarck, para explicar o criacionismo.
c) Mendel, para explicar a genética.
d) Darwin, para explicar o evolucionismo.
e) Lamarck, para explicar o evolucionismo.

QUESTÕES DISCURSIVAS

50. (UFRJ) Os machos de uma certa espécie de pássaros são territoriais, ou seja, são animais que delimitam e defendem a região em que se instalam. Os mais fortes escolhem e ocupam os melhores territórios, dos quais expulsam qualquer outro macho que tente se aproximar. Na época do acasalamento, as fêmeas "passeiam" por todos os territórios e decidem com que macho vão procriar.

O gráfico a seguir mostra a ordem em que 10 machos dessa espécie foram escolhidos. O eixo das ordenadas indica a seqüência em que os machos foram escolhidos e o eixo das abscissas indica a qualidade dos territórios.

a) O que determina a escolha preferencial dos machos pelas fêmeas?
b) Qual o mecanismo evolutivo que explica esse padrão?

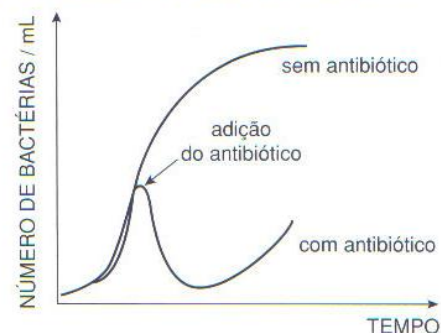
51. (UNICAMP) Em 1950, o vírus mixoma foi introduzido em uma região da Austrália para controlar o grande aumento de coelhos europeus. O primeiro surto de mixomatose matou 99,8 % dos coelhos infectados. O surto seguinte matou 90%. No terceiro surto somente 40 a 60% dos coelhos infectados morreram e a população voltou a crescer novamente. O vírus é transmitido por mosquitos que só picam coelhos vivos. O declínio da mortalidade dos coelhos foi atribuído a fatores evolutivos.

a) Do ponto de vista evolutivo, o que ocorreu com a população de coelhos?
b) Como os mosquitos podem ter contribuído para diminuição da mortalidade dos coelhos?

52. (FUVEST) Uma população de bactérias foi colocada em um meio de cultura saturado de um determinado antibiótico. A maioria das bactérias morreu. No entanto, algumas sobreviveram e deram origem a linhagens resistentes a este antibiótico.

a) Explique o processo segundo a teoria lamarckista de evolução.
b) Explique o processo segundo a teoria darwinista de evolução.

53. (Uerj) Foram introduzidas em dois frascos, que contêm um mesmo meio de cultura, quantidades idênticas de um tipo de bactéria. Após algum tempo de incubação, adicionou-se, a apenas um dos frascos, um antibiótico estável, de uso freqüente na clínica e cuja concentração não se modificou durante todo o experimento.

O gráfico abaixo representa a variação do número de bactérias vivas no meio de cultura, em função do tempo de crescimento bacteriano em cada frasco.

A observação do gráfico permite concluir que, no frasco em que se adicionou o antibiótico, ocorreu uma grande diminuição no número de bactérias.

Utilizando a teoria da seleção natural, explique o fato de essa população ter voltado a crescer, após a diminuição observada.

CAPÍTULO

10 TEORIA MODERNA DA EVOLUÇÃO

▶ Um exemplo extremo de adaptação pode ser notado no inseto conhecido como "bicho-pau", que se assemelha a um graveto.

10.1 Teoria moderna da evolução

O surgimento da Genética no início do século XX e seu grande desenvolvimento nas primeiras décadas de 1900 permitiram a reinterpretação da teoria evolucionista de Darwin à luz das novas descobertas sobre a hereditariedade. Durante as décadas de 1930 e 1940, os conhecimentos genéticos foram incorporados às idéias darwinianas em uma síntese evolucionária, da qual resultou uma teoria mais abrangente e mais consistente, que ficou conhecida como **teoria moderna da evolução**, ou **teoria sintética**.

A teoria sintética é às vezes chamada de neodarwinismo, mas os dois termos não são sinônimos. Neodarwinismo aparece pela primeira vez em um artigo do biólogo inglês Georges John Romanes (1848-1894), publicado em 1886 pela revista *Linnean Society* e intitulado *Physiological Selection: an Additional Suggestion on The Origin of Species* (*Seleção fisiológica: uma sugestão adicional a A origem das espécies*). Nesse artigo, Romanes sugere algumas pequenas mudanças na proposta de Darwin, com quem declarou ter conversado pessoalmente sobre evolucionismo. As idéias de Darwin acrescidas dessas sugestões passaram a constituir o neodarwinismo.

Segundo Ernst Mayr, a expressão ***síntese evolucionária*** foi introduzida pelo biólogo inglês Julian Sorell Huxley (1887-1975), em 1942, para designar a aceitação de duas conclusões: a) a evolução pode ser explicada pelas mutações e pela recombinação genética, orientadas pela seleção natural; b) o fenômeno evolutivo pode ser explicado de maneira consistente com base nos mecanismos genéticos conhecidos. Assim, a teoria moderna da evolução incorpora ao conceito de seleção natural, ponto central do darwinismo, as explicações genéticas para a origem da diversidade das características nos indivíduos de uma população. Darwin não dispunha de uma explicação consistente para a origem da diversidade, pois em sua época os princípios da Genética ainda não haviam sido estabelecidos; isso acabou por expor sua teoria a críticas que ele não pôde responder adequadamente.

Mesmo após o surgimento da Genética, ainda demorou algumas décadas para que o conhecimento produzido nessa área fosse adequadamente incorporado às idéias evolucionistas. Isso ocorreu nas décadas de 1930 e 1940 e teve como principais artífices, entre outros, o geneticista Theodosius Dobzhansky (1900-1975), o zoólogo Ernst Mayr (1904-2005), o paleontólogo George Gaylord Simpson (1902-1984) e o botânico George Ledyard Stebbins (1906-2000). **(Tab. 10.1) (Fig. 10.1)**

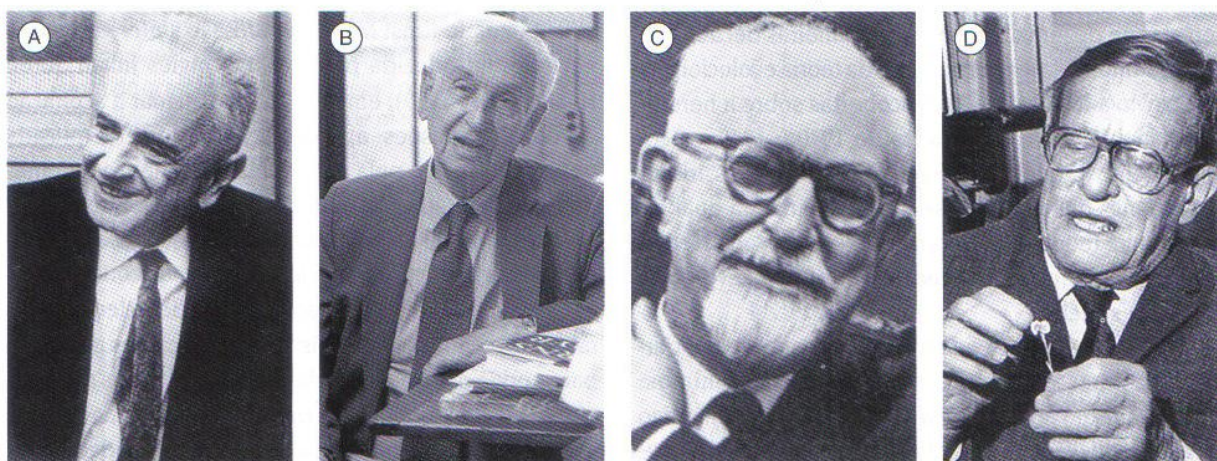
10.2 Os fatores evolutivos

A teoria moderna da evolução considera três fatores evolutivos principais: mutação gênica, recombinação gênica e seleção natural. Os dois primeiros são responsáveis pela origem das variações hereditárias: novos alelos, originados por mutação, e novas combinações gênicas, originadas por recombinação, garantem que os indivíduos de cada espécie com reprodução sexuada sejam geneticamente variados a cada geração. Essa diferença genética entre os indivíduos de uma população, conhecida como **variabilidade genética**, ou diversidade genética, é gerada, portanto, por mutações ao longo da história evolutiva da espécie e por recombinação genética a cada geração, sendo a matéria-prima sobre a qual a seleção natural atua. **(Fig. 10.2)**

Mutação gênica

Mutações gênicas são alterações do código de bases nitrogenadas do DNA, que originam novas versões de genes — alelos —, as quais podem produzir novas características nos portadores da mutação. A característica produzida por um alelo mutante pode conferir alguma vantagem ao seu possuidor e, nesse caso, o novo alelo surgido tende a ser preservado pela seleção natural.

TABELA 10.1 • Cronologia de eventos e publicações importantes na elaboração da teoria sintética da evolução

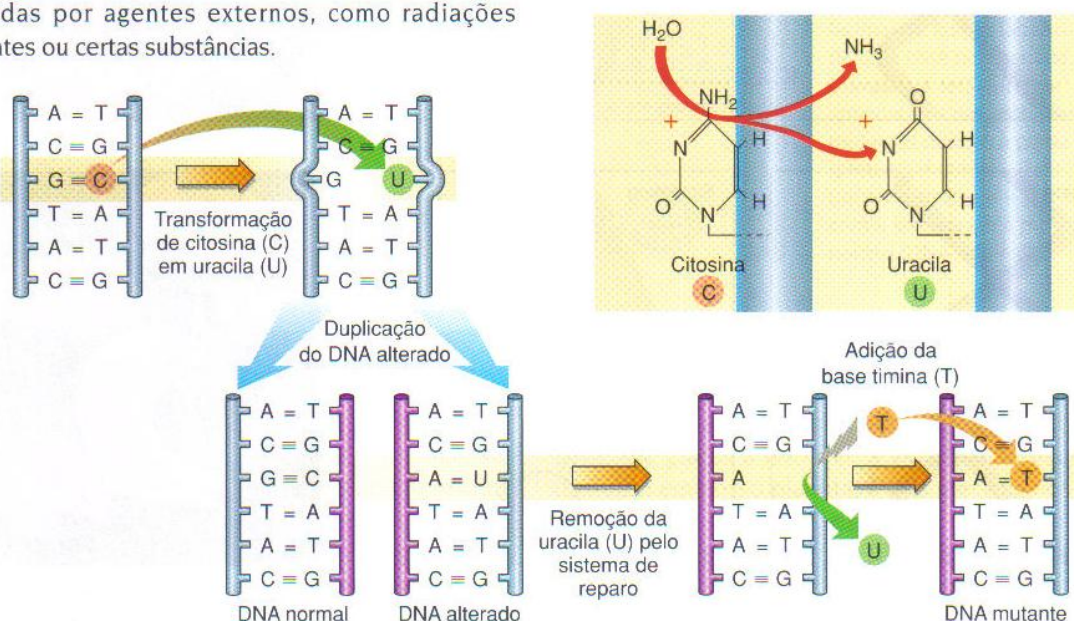
1859	Publicação da primeira edição de *A origem das espécies*, de Charles Darwin.
1886	Publicação do trabalho *Seleção fisiológica: uma sugestão adicional a A origem das espécies*, de Georges J. Romanes, que utiliza pela primeira vez o termo *neodarwinismo*.
1936	Série de conferências sobre Genética e a origem das espécies, proferidas por Theodosius Dobzhansky, na Universidade de Columbia, EUA.
1941	Série de conferências intituladas *Sistemática e a origem das espécies*, proferidas por Ernst Mayr e publicadas em 1942.
1944	Publicação do livro *Velocidade e padrão em evolução*, de George Gaylord Simpson.
1950	Publicação do livro *Variação e evolução em plantas*, de George Ledyard Stebbins.

▲ **Figura 10.1** • Quatro dos principais articuladores da teoria sintética da evolução: **A.** Theodosius Dobzhansky; **B.** Ernst Mayr; **C.** George Gaylord Simpson; **D.** George Ledyard Stebbins.

◀ **Figura 10.2** • A variabilidade gênica de uma população como a espécie humana decorre do fato de os indivíduos apresentarem diferentes combinações de alelos, que surgem por mutação na história evolutiva do grupo. Apesar de 99,9% do DNA ser idêntico em todas as pessoas, o 0,1% que varia responde por nossas diferenças individuais.

O conjunto de genes típico de cada uma das espécies atuais é resultado do acúmulo de mutações vantajosas que vêm ocorrendo e perpetuando-se pela ação da seleção natural, durante os bilhões de anos de evolução biológica. Por isso, muitas das mutações vantajosas possíveis já foram selecionadas, o que explica porque a maioria das mutações que ocorrem hoje é deletéria, isto é, causa desvantagem aos possuidores da mutação, que tendem a ser eliminados por seleção natural.

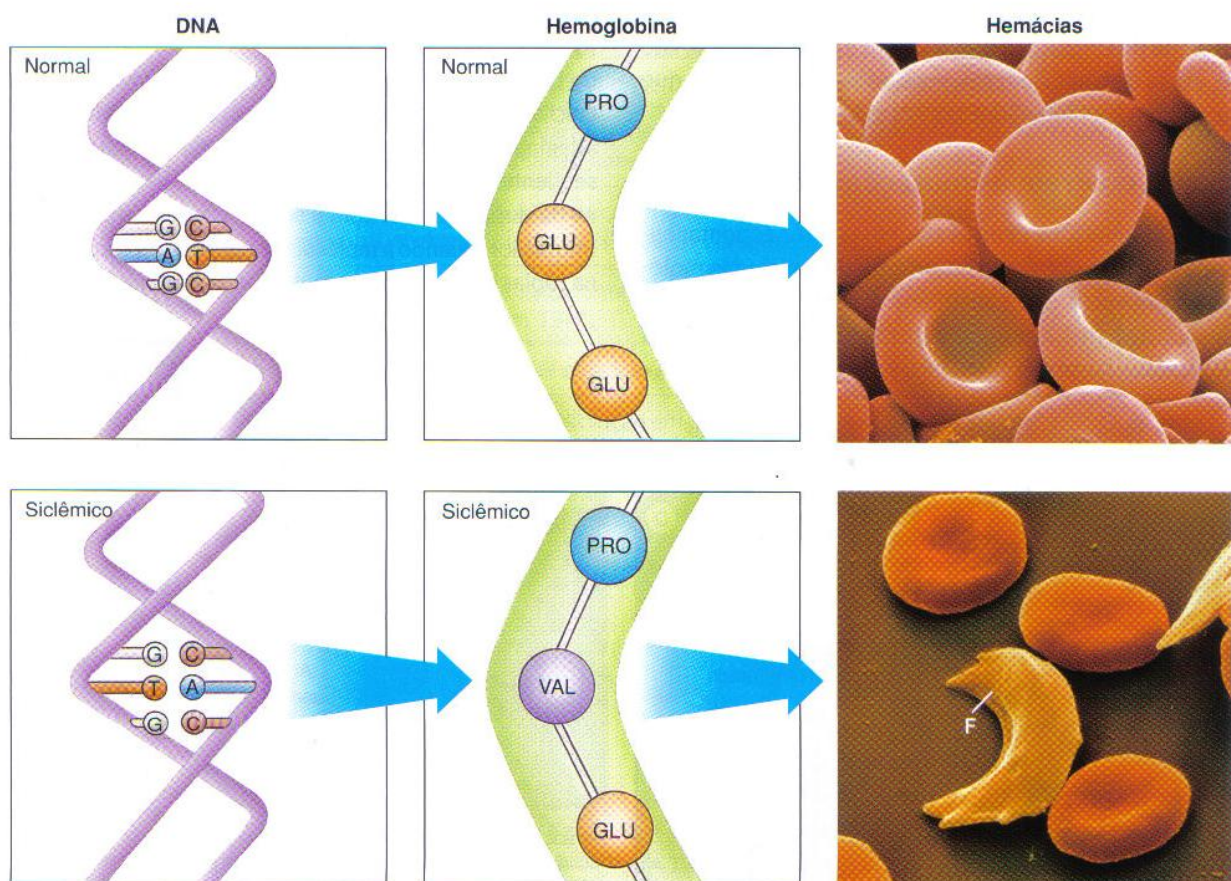
Como ocorrem as mutações gênicas?

As mutações gênicas podem ocorrer espontaneamente, em decorrência da própria dinâmica das moléculas orgânicas que constituem o DNA, ou podem ser induzidas por agentes externos, como radiações ionizantes ou certas substâncias.

Uma das causas de mutações espontâneas é a transformação temporária de uma base nitrogenada em outra, fenômeno chamado de tautomeria, que pode causar erros na duplicação dos genes. Por exemplo, sabe-se que a citosina (C) de uma cadeia de DNA pode sofrer perda espontânea de seu grupo amina, transformando-se em uracila (U). Se isso ocorrer exatamente no momento da duplicação do DNA, a citosina alterada, que agora se comporta como uracila, orientará o emparelhamento de um nucleotídio com adenina (A), e não com guanina (G), como deveria ser. Conseqüentemente, uma das moléculas de DNA que se origina da duplicação fica com a seqüência de bases alterada (mutação). Quando a molécula mutante se reproduz, origina cópias idênticas a si e a mutação se perpetua. **(Fig. 10.3)**

▲ **Figura 10.3** • A citosina (C) de um DNA pode espontaneamente perder um grupo amina, transformando-se em uracila (U). O detalhe dessa transformação está mostrado no quadro à direita. Se essa alteração ocorrer durante a duplicação do DNA, pode haver mutação gênica.

A substituição de um par de bases nitrogenadas do DNA por outro nem sempre altera a proteína codificada, pois o código genético é degenerado, isto é, alguns aminoácidos são codificados por mais de um tipo de trinca de bases nitrogenadas. Por exemplo, no DNA, as trincas AAA e AAG codificam o aminoácido fenilalanina, de modo que, se uma mutação substituir o último A da trinca AAA por G, não haverá alteração na proteína, pois o aminoácido codificado pelo DNA mutante continuará a ser fenilalanina.

Na maioria dos casos, porém, a substituição de um único par de nucleotídios no DNA leva à alteração de um aminoácido na proteína por ele codificada, o que pode provocar alterações metabólicas significativas nas células, originando novas características no indivíduo portador da mutação. Por exemplo, o alelo que condiciona siclemia, ou anemia falciforme, uma forma hereditária de anemia, surge pela substituição de um único par de nucleotídios no gene que codifica a cadeia β da hemoglobina. Na forma normal (ou selvagem) do gene, a trinca de pares de bases correspondente ao sexto aminoácido da cadeia β da hemoglobina é GAG/CTC, a qual codifica o aminoácido ácido glutâmico. No alelo mutante siclêmico, nessa mesma posição, a trinca de pares de bases é GTG/CAC, ou seja, o par **A/T** mediano do alelo normal foi substituído pelo par **T/A**. Essa diferença leva à formação de hemoglobina com a cadeia β alterada (siclêmica), na qual o aminoácido valina ocupa o lugar de ácido glutâmico. Basta essa alteração para fazer a hemácia portadora da hemoglobina alterada deformar-se em baixa tensão de gás oxigênio, o que origina a anemia falciforme. **(Fig. 10.4)**

Além da substituição de pares de nucleotídios, também podem ocorrer mutações por perda ou adição de um ou mais pares nucleotídicos na molécula de DNA. Essas mutações são muito mais drásticas do que a substituição de um único par de bases nitrogenadas, pois, enquanto esta afeta apenas um aminoácido, a perda ou adição de um par de nucleotídios altera todos os aminoácidos da proteína a partir do ponto da mutação. **(Fig. 10.5)**

▲ **Figura 10.4** • Diferença entre as seqüências de pares de nucleotídios do alelo normal (acima) e do alelo siclêmico (abaixo), que leva à formação de moléculas alteradas de hemoglobina, causadoras da deformação das hemácias. As fotomicrografias mostram sangue humano ao microscópio óptico. Acima, hemácias normais (aumento ≃3.500 ×); abaixo, hemácia em forma de foice (F) entre hemácias normais (aumento ≃2.800 ×).

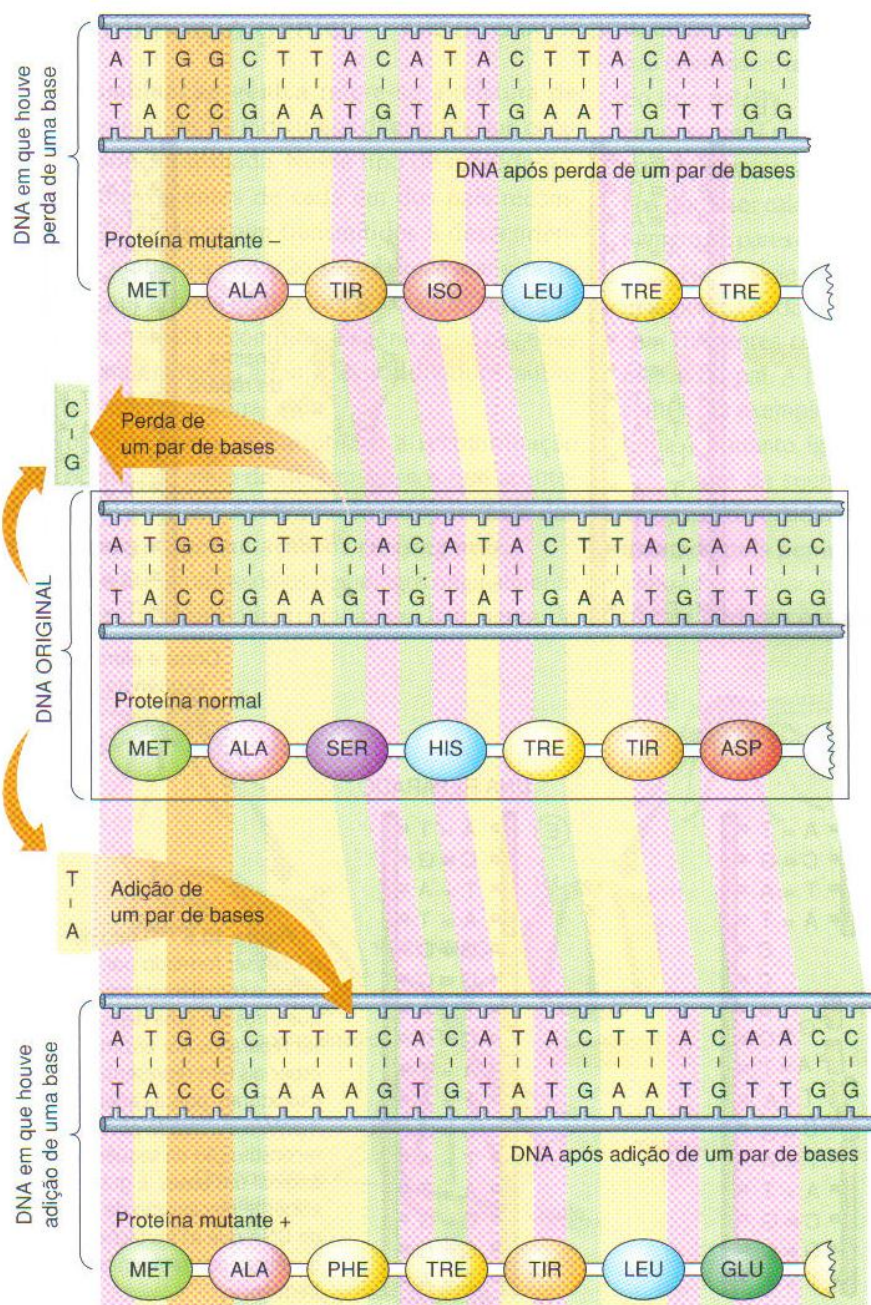



Figura 10.5 • Esquema que representa a proteína codificada por um DNA original (no centro) com DNAs em que ocorre perda (acima) ou adição (abaixo) de uma base nitrogenada. Compare a seqüência de aminoácidos nas proteínas mutantes devidas à perda (proteína mutante –) e à adição (proteína mutante +) de bases com a seqüência na proteína normal (DNA original).

Corrigindo erros: mecanismos de reparo de DNA

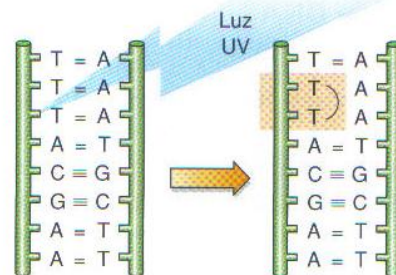
Sabe-se que cada célula humana perde, por dia, cerca de 5 mil bases púricas (adenina e guanina) de seu DNA, o que nos leva a pensar em taxas muito altas de mutação. Entretanto, as taxas de mutação são muito baixas: calcula-se que em um genoma como o nosso, com cerca de 3 bilhões de pares de bases nitrogenadas, ocorre troca efetiva de apenas cerca de 20 pares de bases por ano, o que representa uma taxa de mutação em torno de 0,000002%. Se o DNA é tão suscetível a "acidentes" espontâneos, como perda e substituição de bases, como é possível a taxa de mutação ser tão baixa?

A resposta é que as células desenvolveram um eficiente mecanismo para corrigir erros que atingem o DNA, e é graças a isso que a vida tem se mantido e evoluído em nosso planeta. Esses mecanismos de reparo de erros no DNA envolvem um conjunto de enzimas que reconhecem o DNA alterado, ligam-se a ele e, em seguida, cortam e eliminam a cadeia onde se localiza o defeito. Na seqüência, outras enzimas sintetizam um novo segmento de DNA, tendo por modelo a cadeia complementar que não contém erros. **(Fig. 10.6**, na página seguinte**)**

AÇÃO DO SISTEMA DE REPARO DO DNA

◀ **Figura 10.6** • O fato de o DNA ser formado por duas cadeias complementares permite que erros em uma delas possam ser reparados por enzimas especiais (em representação caricatural), pois a cadeia que se mantém inalterada possibilita a reconstituição da seqüência original das bases. É graças ao eficiente mecanismo de reparo do DNA que as mutações genéticas ocorrem em baixa freqüência.

Mutações induzidas e agentes mutagênicos

As mutações podem ser induzidas por agentes físicos e químicos, chamados genericamente de **agentes mutagênicos**. Por exemplo, radiações ionizantes (que causam a formação de íons dentro das células) como raios X, raios gama e radiação ultravioleta, aumentam as taxas de mutação dos genes de qualquer tipo de ser vivo, desde vírus e bactérias até animais e vegetais. Além das radiações, outros fatores físicos e diversas substâncias aumentam a taxa de mutação dos genes. **(Fig. 10.7)**

▲ **Figura 10.7** • A radiação ultravioleta provoca a união de duas timinas (T) adjacentes, o que pode levar a uma mutação gênica, se o erro não for corrigido.

Recombinação gênica

Recombinação gênica refere-se à mistura de genes provenientes de indivíduos diferentes que ocorre na reprodução sexuada. Nesse tipo de reprodução, os genes provenientes de cada um dos pais recombinam-se antes de serem transmitidos à descendência. Assim, embora a mutação seja a única maneira de surgir uma nova forma gênica (um novo alelo) na população, é por meio da recombinação gênica que os genes se organizam em novos arranjos nos indivíduos, sobre os quais a seleção natural atua.

Nos organismos eucarióticos, a recombinação gênica ocorre por meio de dois processos que acontecem durante a meiose: a **segregação independente dos cromossomos** e a **permutação**, ou ***crossing over***.

Na meiose, cromossomos homólogos originalmente provenientes dos pais podem combinar-se livremente, de tal maneira que os gametas formados podem conter apenas cromossomos do tipo materno, apenas cromossomos do tipo paterno ou, o que é mais provável, misturas de cromossomos maternos e paternos. O número de combinações possíveis entre cromossomos maternos e paternos pode ser calculado pela expressão $2n$, em que n é o número de pares de cromossomos do indivíduo. **(Fig. 10.8)**

Na espécie humana, por exemplo, em que $n = 23$, uma pessoa pode produzir 2^{23} (8.388.608) tipos de gameta, com diferentes combinações entre os cromossomos da mãe e do pai. A probabilidade de um gameta humano conter, por exemplo, apenas cromossomos de origem paterna é, portanto, igual a 1/8.388.608.

Além da segregação independente dos cromossomos, a diversidade de tipos de gameta é muito aumentada pela permutação, ou *crossing over*, fenômeno em que cromossomos homólogos maternos e paternos trocam pedaços entre si durante a meiose.

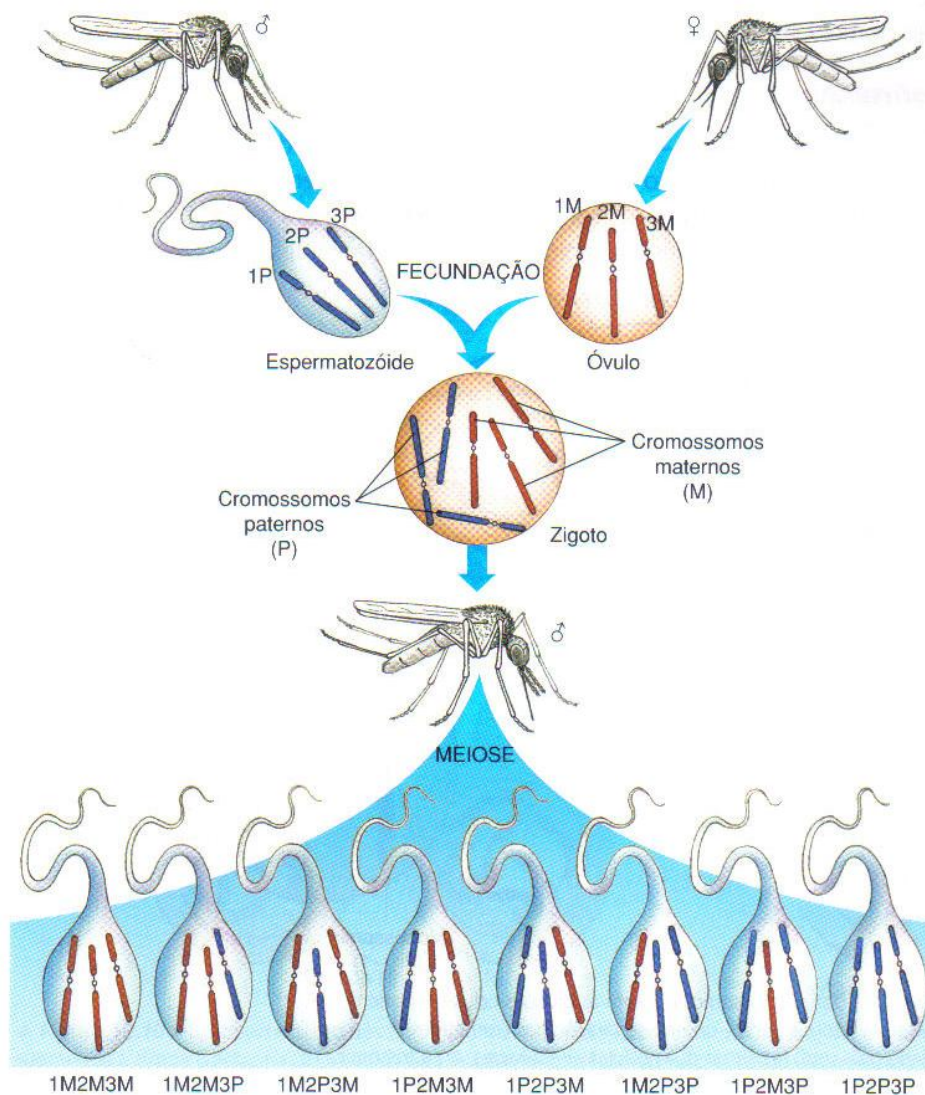



Figura 10.8 • Na meiose ocorre distribuição independente dos cromossomos homólogos de origem materna e paterna. Uma espécie como o pernilongo, que possui apenas três pares de cromossomos, produz oito combinações cromossômicas diferentes nos gametas (2^3).

QUADRO 10.1 • Mutações cromossômicas

Qualquer alteração que afete o número ou a estrutura dos cromossomos de uma célula é denominada **mutação cromossômica**, também chamada de **aberração cromossômica**. As mutações cromossômicas, geralmente, não originam novas versões de genes, mas contribuem para o aparecimento de novas combinações gênicas. Embora menos importantes para a evolução do que a mutação gênica e a recombinação, as mutações cromossômicas têm papel acessório na manutenção da variabilidade gênica de certas populações naturais.

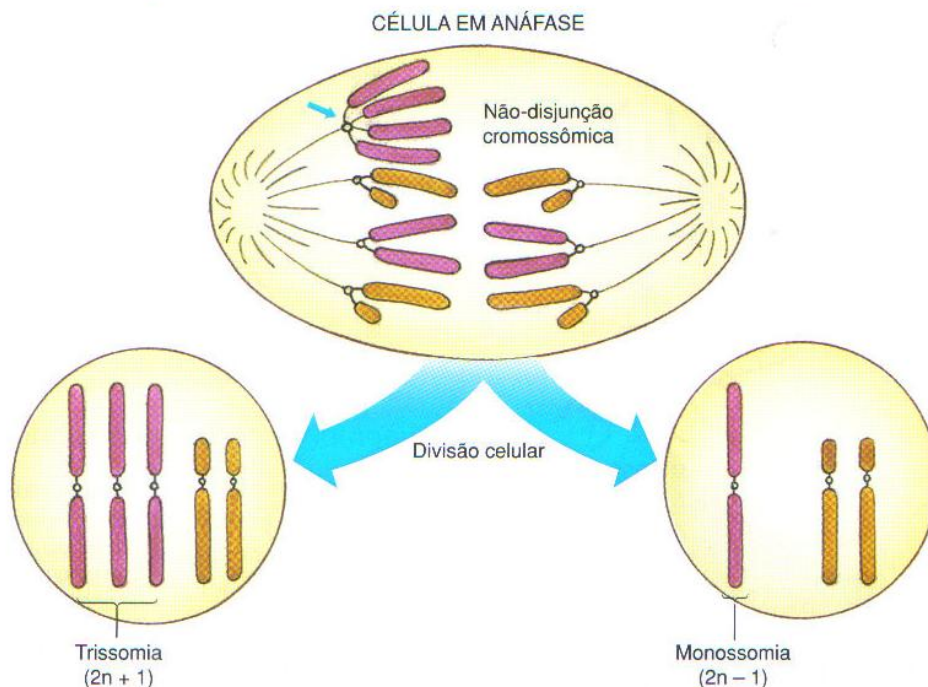
As mutações cromossômicas podem ser classificadas em dois tipos: numéricas e estruturais. **Mutações numéricas** são aquelas em que há alteração no número de cromossomos da célula. **Mutações estruturais** são aquelas em que há alteração na forma ou no tamanho de um ou mais cromossomos da célula.

Mutações cromossômicas numéricas

As mutações cromossômicas numéricas são classificadas em aneuploidias e euploidias. **Aneuploidias** são alterações em que há perda ou acréscimo de um ou mais cromossomos da célula. **Euploidias** são alterações em que há perda ou acréscimo de lotes cromossômicos (genomas) completos.

As aneuploidias surgem devido a erros na distribuição dos cromossomos durante as divisões celulares, tanto na mitose quanto na meiose. As células resultantes da divisão anormal ficam com excesso ou falta de cromossomos. **(Fig. 10.9)**

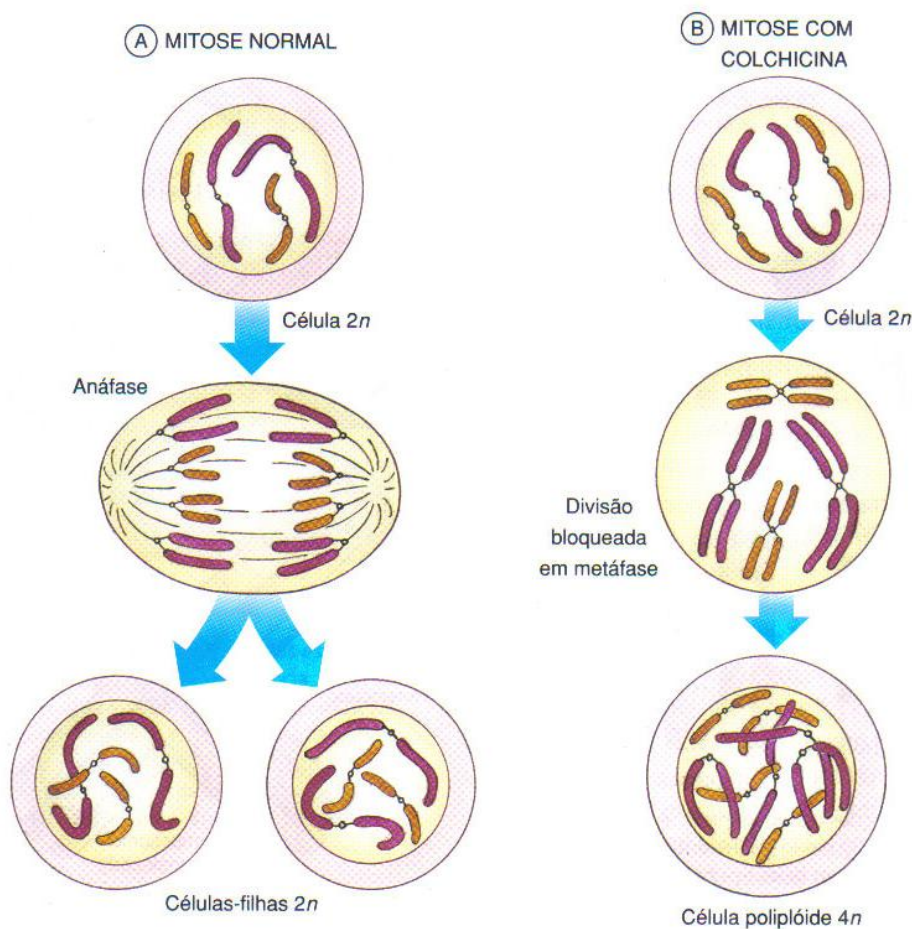
As aneuploidias geralmente causam distúrbios. Na espécie humana, por exemplo, são conhecidas diversas doenças causadas por aneuploidias. As mais comuns são a síndrome de Down, causada pela trissomia do cromossomo 21 (47, XX ou 47, XY), a síndrome de Turner, causada pela monossomia do cromossomo sexual X (44, X0), e a síndrome de Klinefelter, causada por trissomia envolvendo os cromossomos sexuais (47, XXY). Relembre o que são essas síndromes cromossômicas no capítulo 7 do volume 1 desta coleção.

Euploidias surgem quando os cromossomos se duplicam e a célula não se divide. Algumas espécies vegetais cultivadas apresentam euploidias, como o trigo (gênero *Triticum*), em que há variedades diplóides (2n=14), tetraplóides (4n=28) e hexaplóides →

▲ **Figura 10.9** • Erros na distribuição dos cromossomos durante as divisões celulares podem causar aneuploidias. Na ilustração, a não-disjunção, ou não-separação das cromátides de um dos homólogos (apontado pela seta) faz surgir duas células aneuplóides, uma trissômica (2n + 1) e outra monossômica (2n – 1).

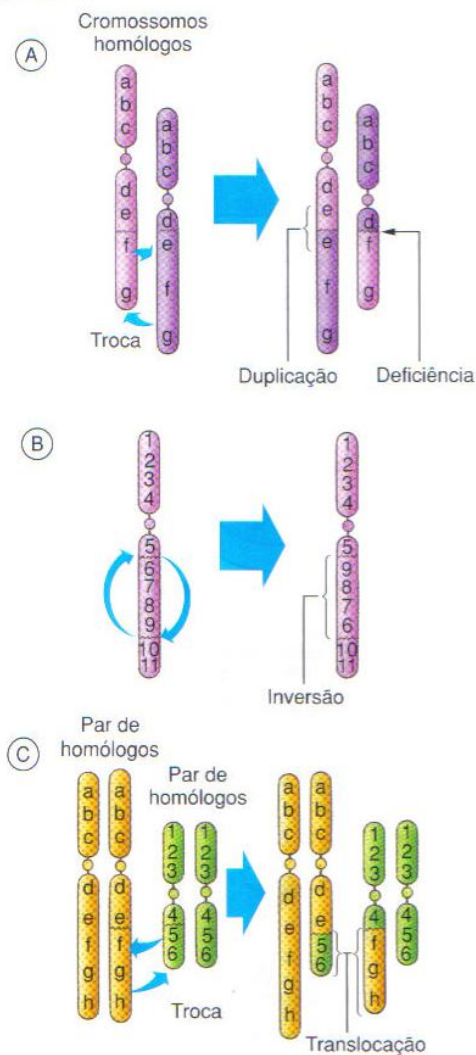
(6n=42). Genericamente, quando o número de lotes cromossômicos (genomas) é maior do que 2, fala-se em **poliploidia**. **(Tab. 10.2)**

Variedades poliplóides são, em muitos casos, maiores e mais produtivas que as diplóides. Além de aproveitar os casos de poliploidia que surgem espontaneamente na natureza, podemos induzir euploidias em plantas cultivadas por meio de drogas como a colchicina, que bloqueia a formação do fuso durante as divisões celulares. **(Fig. 10.10)** →

TABELA 10.2 • Classificação das mutações cromossômicas numéricas

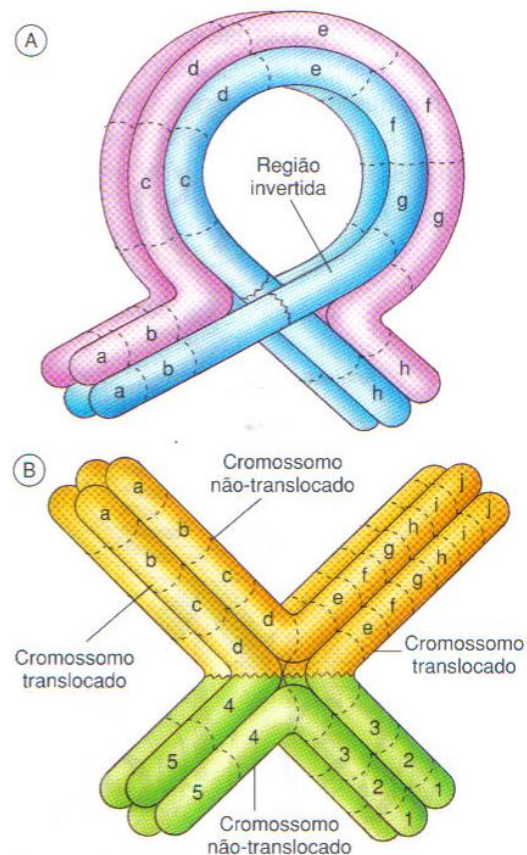
Tipo de mutação		Número de cromossomos
Euploidias	Haploidia	n
	Triploidia	$3n$
	Tetraploidia	$4n$
Aneuploidias	Nulissomia	$2n - 2$
	Monossomia	$2n - 1$
	Trissomia	$2n + 1$
	Tetrassomia	$2n + 2$

▲ **Figura 10.10** • Comportamento dos cromossomos de uma célula na mitose normal (**A**) e quando submetida à droga colchicina (**B**). A colchicina impede a formação do fuso mitótico, bloqueando a célula em metáfase. Não ocorre divisão e a célula torna-se tetraplóide (4n).

Mutações cromossômicas estruturais

As mutações cromossômicas estruturais resultam de quebras cromossômicas seguidas de perda de pedaços ou de ressoldaduras dos pedaços em posições diferentes da original. As mutações estruturais podem ser classificadas em: a) **deficiência**, ou **deleção**, quando falta um pedaço ao cromossomo; b) **duplicação**, quando o cromossomo tem um pedaço repetido; c) **inversão**, quando o cromossomo tem um pedaço invertido; d) **translocação**, quando um cromossomo tem um pedaço proveniente de um outro cromossomo. **(Fig. 10.11)**

▲ **Figura 10.11** • Mutações cromossômicas. **A.** Quando ocorre uma troca de pedaços não-equivalentes entre dois cromossomos homólogos, um deles fica com genes duplicados e o outro, com deficiência (deleção) de genes. **B.** Quando ocorre uma inversão, o cromossomo fica com determinada seqüência de genes invertida em relação ao normal. **C.** Quando ocorre uma translocação recíproca, cromossomos não-homólogos ficam com pedaços trocados.

Inversões e translocações homozigóticas e heterozigóticas

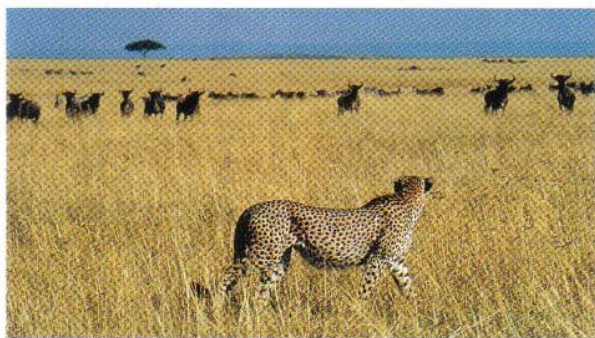
As mutações estruturais podem ocorrer nas condições homozigóticas ou heterozigóticas. Fala-se em **mutação homozigótica** quando ambos os membros de um par de cromossomos a apresentam. Fala-se em **mutação heterozigótica** quando apenas um dos cromossomos do par de homólogos apresenta a mutação.

As mutações cromossômicas em estado heterozigótico podem ser identificadas ao microscópio durante o emparelhamento dos homólogos na meiose. Como esse emparelhamento ocorre rigorosamente loco por loco, se um dos cromossomos apresentar a mutação e o outro não, o emparelhamento meiótico resulta em formato típico. Por exemplo, na inversão heterozigótica, forma-se uma alça nos cromossomos emparelhados; na translocação heterozigótica, forma-se uma cruz; na duplicação ou deleção, forma-se um cotovelo. **(Fig. 10.12)**

▲ **Figura 10.12** • Emparelhamento dos cromossomos homólogos na meiose, em um indivíduo portador de uma inversão heterozigótica (**A**) e de uma translocação heterozigótica (**B**). Analise a figura acompanhando as explicações no texto.

Seleção natural e adaptação

Segundo Darwin, todos os organismos, sejam plantas, animais ou bactérias, "lutam" para sobreviver a cada instante de suas vidas. Apenas os mais aptos a enfrentar os desafios, em cada contexto particular, sobrevivem. A "luta pela sobrevivência", metáfora utilizada por Darwin para a seleção natural, inspira-se no fato de que, entre os animais, alguns são presas e têm de evitar ser devorados; outros são predadores e têm de capturar animais que lhes sirvam de alimento, ou morrerão de fome.

Entretanto, há formas menos evidentes de lutar pela vida: por exemplo, machos disputam a atenção das fêmeas e o direito de cruzar com elas, o que lhes permite perpetuar suas características. Plantas competem umas com as outras pela umidade do solo, por nutrientes e até mesmo pela luz solar.

De uma forma ou de outra, em última análise, a seleção natural significa **reprodução diferencial** dos indivíduos de uma população, em que os mais bem adaptados têm maior chance de deixar descendentes. A seleção decorre das restrições que o meio impõe à sobrevivência dos organismos, tais como disponibilidade de alimento, disputa por recursos com outros seres vivos, ação de predadores e parasitas, doenças etc. Nessas condições, os mais aptos são aqueles que herdam combinações gênicas favoráveis à sobrevivência e à reprodução, em um ambiente particular. **(Fig. 10.13)**

▲ **Figura 10.13** • Um guepardo, ao atacar um bando de gnus, está desempenhando um importante papel no processo que garante a continuidade da evolução das espécies, a seleção natural. Um gnu com uma deficiência, por menor que seja, como um defeito de visão, uma fraqueza muscular ou uma coloração diferente que diminua sua camuflagem, tem maior chance de ser capturado pelo guepardo. Isso impede que genes eventualmente responsáveis pela deficiência sejam passados para a geração seguinte.

Quais são os alvos da seleção natural?

Uma pergunta que tem causado polêmica entre os estudiosos da evolução é: qual é o alvo da seleção natural ou, em outras palavras, sobre o que ela atua?

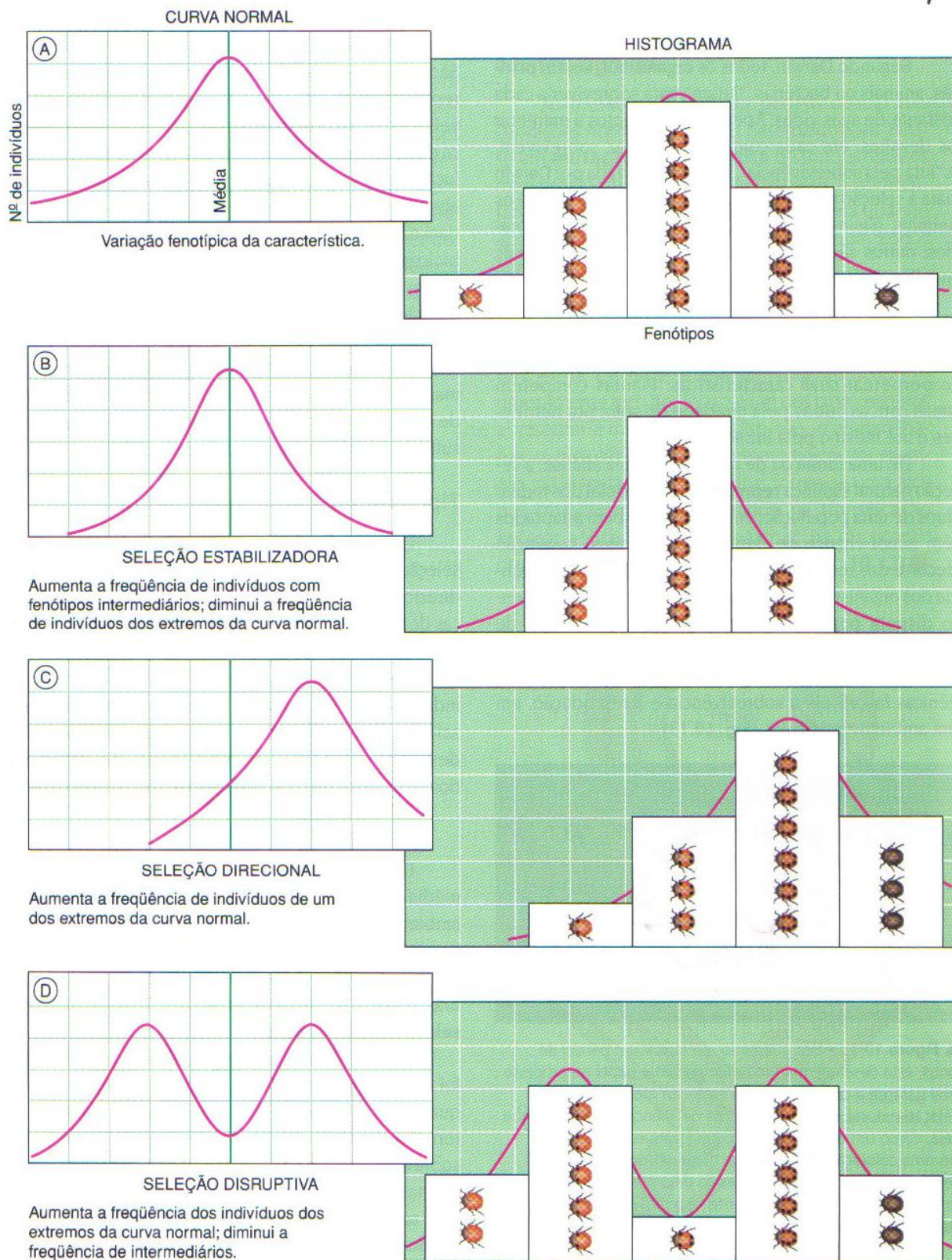
Para Darwin e a maioria dos naturalistas que o sucederam, a seleção natural atua sobre os indivíduos. São estes que lutam pela sobrevivência, sobrevivem e reproduzem-se, transmitindo suas características favoráveis à prole. No entanto, o desenvolvimento da Genética e o reconhecimento da importância dos genes na evolução têm levado alguns geneticistas a reivindicar, como alvos da seleção, os genes e não os indivíduos: estes seriam nada mais do que veículos genéticos. A maioria dos biólogos, porém, reconhece que são os indivíduos, atuando em seu contexto populacional, os principais alvos da seleção natural; genes são apenas componentes do genótipo, enquanto o alvo da seleção natural é o organismo como um todo. Os genes atuam em conjunto e, na maioria dos casos, é impossível destacar a participação de um gene individual na cadeia de processos que resulta no fenótipo sobre o qual a seleção atua.

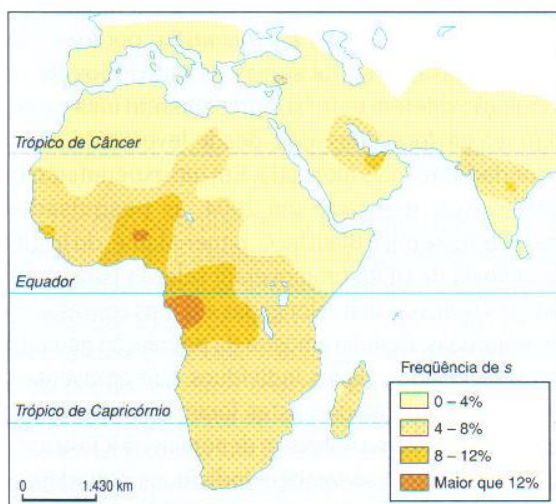
Tipos de seleção

Quanto aos efeitos que exerce nas populações, a seleção natural é classificada em três tipos: estabilizadora, direcional e disruptiva. Admitindo-se que as características de uma população se distribuam de acordo com uma curva normal, a seleção estabilizadora confere vantagem aos indivíduos médios; a seleção direcional favorece os indivíduos de um ou outro extremo da curva normal; a seleção disruptiva, por sua vez, favorece os indivíduos de ambos os extremos da curva normal, em detrimento dos indivíduos médios. (**Fig. 10.14**, na página seguinte)

Seleção estabilizadora

Em ambientes relativamente estáveis, em que a média dos indivíduos está bem adaptada às condições ambientais, a seleção natural reforça essa tendência, favorecendo indivíduos médios e selecionando negativamente indivíduos que apresentam características extremas. Esse tipo de seleção é, por isso, chamada de **seleção estabilizadora**.

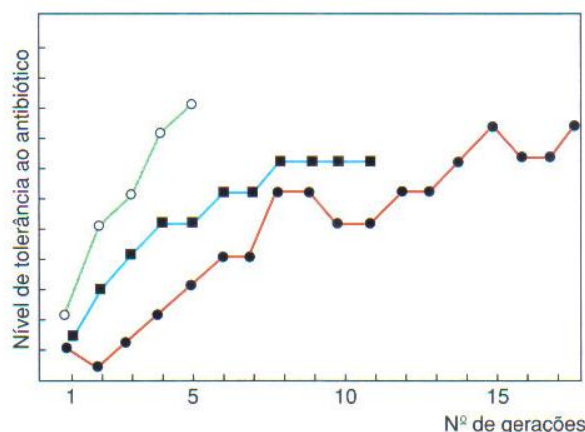
Um exemplo da atuação da seleção estabilizadora foi obtido em pesquisas realizadas em hospitais, nas quais se constatou que crianças nascidas com peso em torno da média (entre 3 kg e 4,5 kg) têm maior índice de sobrevivência que crianças muito grandes ou muito pequenas. Outro exemplo foi obtido por um pesquisador que, ao recolher pássaros de determinada espécie mortos durante uma tempestade, constatou que a maioria tinha asas muito pequenas ou muito grandes em relação à média. A tempestade agia, portanto, como agente seletivo, eliminando preferencialmente os pássaros com asas de tamanhos extremos e preservando aqueles com asas de tamanho médio.

▲ **Figura 10.14** • **A.** Gráfico denominado pelos matemáticos curva normal, que representa o número de indivíduos para cada variedade fenotípica de um dado caráter com variação contínua. **B.** A seleção estabilizadora favorece os fenótipos mais comuns, que representam a média. **C.** A seleção direcional favorece os fenótipos de um dos extremos da curva. **D.** A seleção disruptiva favorece os fenótipos extremos de ambos os extremos da curva normal.

Um exemplo de seleção estabilizadora na espécie humana é o favorecimento das pessoas heterozigóticas para o alelo da **siclemia**, ou **anemia falciforme**, em regiões onde a malária é endêmica. Como as pessoas homozigóticas para o alelo condicionante da siclemia (*ss*) são fortemente anêmicas e, em geral, morrem antes de se reproduzir, a tendência seria esse alelo praticamente desaparecer da população. É isso realmente que acontece na maior parte do mundo. Entretanto, estudos genéticos mostraram que, em locais onde a malária é endêmica, a freqüência do alelo mutante é surpreendentemente elevada. Descobriu-se que isso ocorre porque as pessoas heterozigóticas (*Ss*) são mais resistentes à malária que as pessoas homozigóticas normais (*SS*). Como estas tendem a morrer de malária, e as homozigóticas siclêmicas (*ss*), de anemia, quem tem maior chance de sobreviver e reproduzir-se são as pessoas heterozigóticas (*Ss*), que assim transmitem o alelo *s* à geração seguinte. É por isso que o alelo para a siclemia mantém-se em freqüências relativamente altas nessas populações. **(Fig. 10.15)**

▲ **Figura 10.15** • Freqüência do alelo *s* que condiciona a anemia falciforme na África, no Oriente Médio e na Índia. As populações em que o alelo causador da doença está presente em freqüência alta vivem em regiões em que há grande incidência de malária.

Pode-se supor que, se a malária for erradicada dessas regiões, a atual "condição desfavorável" das pessoas normais homozigóticas (*SS*) em relação às heterozigóticas (*Ss*) desaparecerá, pois a malária deixará de atuar como agente seletivo. Na ausência da doença, o alelo *s* será progressivamente eliminado da população, pois as pessoas homozigóticas para a siclemia continuarão a morrer de anemia. Foi o que aconteceu com populações negras que viviam em áreas de malária endêmica, na África, e que foram levadas como escravas para a América do Norte, onde a doença é praticamente inexistente. Nos afro-americanos descendentes dessas populações, a freqüência do alelo *s* vem diminuindo progressivamente ao longo das gerações.

Seleção direcional

Quando ocorrem mudanças ambientais e um fenótipo antes desfavorável passa a ser favorecido, fala-se em **seleção direcional**. O aparecimento de linhagens de bactérias resistentes a antibióticos e de moscas resistentes a inseticidas são dois bons exemplos.

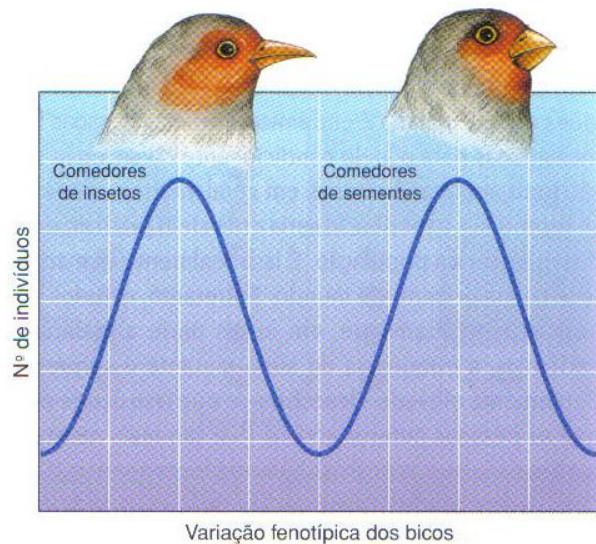
Nas populações bacterianas sempre estão surgindo, por mutação, bactérias capazes de resistir a diversas substâncias tóxicas, entre elas os antibióticos. Na ausência dessas substâncias no meio, as bactérias mutantes não levam nenhuma vantagem sobre as bactérias não-mutantes (selvagens), sendo logo eliminadas pela competição com estas últimas. Entretanto, se houver bactérias mutantes capazes de resistir a um antibiótico presente no meio, elas tenderão a se multiplicar, pois a droga agirá como agente seletivo, matando as bactérias selvagens e deixando os recursos do ambiente à disposição das bactérias mutantes resistentes. Estas se reproduzem e originam populações de bactérias resistentes, contra as quais o antibiótico terá pequeno efeito. Desde que os antibióticos começaram a ser empregados em larga escala, logo após a Segunda Guerra Mundial, já foram selecionadas inúmeras linhagens bacterianas altamente resistentes aos mais diversos tipos de antibiótico. **(Fig. 10.16)**

▲ **Figura 10.16** • Gráfico que mostra os resultados de três experimentos (curvas coloridas) em que linhagens da bactéria *Escherichia coli* desenvolveram resistência ao antibiótico cloranfenicol. Gerações sucessivas foram cultivadas em meios que continham concentrações crescentes desse antibiótico. A explicação é que foram selecionadas diversas mutações para resistência.

Do mesmo modo que os antibióticos atuam como agentes seletivos de linhagens de bactérias resistentes, os inseticidas também atuam como agentes seletivos de linhagens resistentes de insetos. Em populações de insetos sempre surgem indivíduos mutantes, capazes de resistir a diversas drogas, entre elas os inseticidas. Se um inseticida for aplicado sobre uma população de insetos em que haja mutantes capazes de resistir à droga, os indivíduos selvagens tenderão a ser eliminados, deixando espaço para a multiplicação dos resistentes; logo, estes passam a constituir a quase totalidade da população.

Tanto no caso da aquisição de resistência a antibióticos como da resistência a inseticidas, é a própria droga que atua como agente seletivo, eliminando os portadores de genótipos sensíveis e favorecendo a proliferação dos portadores de genótipos resistentes.

Seleção disruptiva ou diversificadora

Seleção disruptiva é aquela que favorece os indivíduos portadores de características extremas em uma curva normal, enquanto os indivíduos médios levam desvantagem. Esse tipo de seleção leva à diversificação da população, favorecendo os extremos e eliminando a média. Em um exemplo hipotético, se uma espécie de pássaro tivesse apenas dois tipos de alimento — sementes duras e larvas escondidas na madeira —, seriam favorecidos aqueles dotados de bico fino e delicado, que teriam mais facilidade em capturar as larvas, e os de bico maior e mais forte, capaz de quebrar sementes. Pássaros de bico intermediário levariam desvantagem por não serem muito hábeis na obtenção de nenhum dos dois tipos de alimento. **(Fig. 10.17)**

Um exemplo real de seleção disruptiva foi verificado em populações de plantas que crescem em regiões próximas de minas de chumbo ou zinco. Certas áreas do solo, onde são lançados os rejeitos de minério, têm alto índice de contaminação por esses metais, mantendo fronteiras bem definidas com áreas não-contaminadas. Plantas que se desenvolvem bem em solos não-contaminados morreriam em solos contaminados. Por outro lado, plantas capazes de sobreviver em solos contaminados levam grande desvantagem nas áreas sem contaminação, pois perdem na competição com as plantas lá estabelecidas. Conseqüentemente, a seleção disruptiva nessas regiões levou ao desenvolvimento de dois tipos de plantas, marcadamente distintos em vários aspectos, um adaptado a áreas não-contaminadas e outro adaptado a áreas contaminadas.

▲ **Figura 10.17** • Um exemplo hipotético de seleção disruptiva.

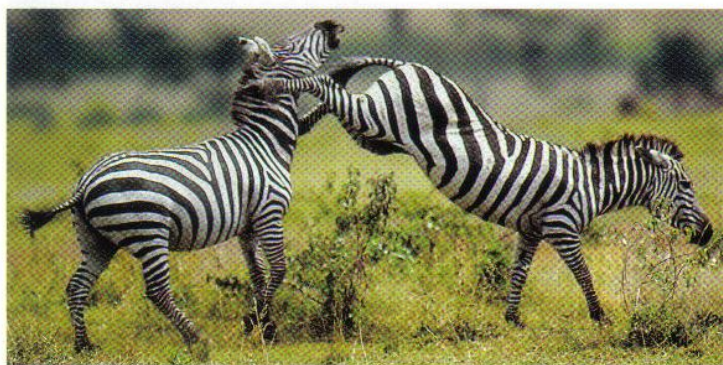
A seleção disruptiva pode ser promovida experimentalmente, selecionando, em cada geração, os indivíduos com fenótipos extremos para uma característica com distribuição normal, como pais da geração seguinte. Na mosca ***Drosophila melanogaster***, por exemplo, a forma das asas é elíptica, mas os indivíduos de uma população diferem entre si, apresentando uma variação contínua na forma das asas, desde levemente mais arredondada até mais alongada. Em um experimento com essa mosca, realizado em 2004, as pesquisadoras Danielle Tesseroli e Blanche C. Bitner-Mathé, do Instituto de Biologia da UFRJ, promoveram seleção para obter linhagens com asas mais alongadas e outras com asas mais arredondadas. De uma amostra da população natural, foram selecionados alguns indivíduos que apresentavam asas mais arredondadas; estes foram cruzados entre si, dando origem a uma linhagem denominada R (asa redonda). Selecionaram-se também indivíduos portadores de asas mais alongadas, que foram cruzados entre si, originando uma linhagem denominada L (asa alongada). A cada geração eram selecionados, da linhagem R, os indivíduos de asas mais arredondadas para serem os pais da geração seguinte. De forma semelhante, os indivíduos de asas mais alongadas foram selecionados como os pais da geração seguinte na linhagem L. Após 20 gerações, os indivíduos da linhagem R apresentavam asas bem mais arredondadas que os da população original, enquanto os da linhagem L apresentavam asas bem mais alongadas. **(Fig. 10.18)**

Acredita-se que, por ser capaz de promover a diversificação de uma população, a seleção disruptiva represente um primeiro passo para a formação de novas espécies.

▲ **Figura 10.18** • Acima, gráfico da distribuição da forma das asas em uma população natural de *Drosophila melanogaster* coletada no campo, a partir da qual foi iniciada a seleção. Cada barra vertical verde corresponde ao número de indivíduos de cada fenótipo. À direita do gráfico, foto (**A**) de uma asa de fenótipo médio da população do campo. Abaixo, gráfico da distribuição da forma das asas após 20 gerações de seleção para asa mais alongada, em vermelho, e para asa mais arredondada, em azul. **B.** Foto de uma asa média da linhagem selecionada para forma alongada. **C.** Foto de uma asa média da linhagem selecionada para forma arredondada. Note como os fenótipos extremos foram acentuados pela seleção.

Seleção sexual

Um caso particular de seleção natural que ocorre em diversas espécies é a **seleção sexual**, em que os indivíduos de um sexo (em geral, as fêmeas) preferem se acasalar com parceiros portadores de determinadas características. Esse tipo particular de seleção natural foi abordado detalhadamente por Darwin em *A origem das espécies*: "Devo dizer algumas palavras acerca do que chamo de seleção sexual. Esta não depende da luta pela existência, mas sim da luta travada pelos machos visando a posse das fêmeas. Para o derrotado a conseqüência não é a morte, e sim a redução parcial ou total de sua descendência. Por conseguinte, a seleção sexual é menos rigorosa do que a seleção natural".

Em muitas espécies de animais, os machos exibem seus atributos masculinos com o intuito de conquistar as fêmeas e fecundá-las, garantindo assim a perpetuação de suas características. Esses atributos podem ser o canto ou a plumagem colorida, no caso de muitos pássaros, e a agressividade e a força física, no caso de certos mamíferos. Darwin observou que as características sexuais secundárias dos machos estavam relacionadas com a atração e a conquista das fêmeas. Os machos mais bem-dotados, de acordo com o critério de cada espécie, têm maiores chances de se reproduzir e, assim, de perpetuar suas características. **(Fig. 10.19)**

◄ **Figura 10.19** • À esquerda, machos de zebra em luta pela disputa de fêmeas. À direita, casal de fragatas em que o macho, de papo vermelho, exibe-se para a fêmea.

Adaptação pela seleção natural

O termo *adaptação* (do latim *adaptare*, tornar apto) significa, para os biólogos, a capacidade que todo ser vivo tem de ajustar-se ao ambiente, isto é, de transformar-se em resposta a uma alteração ambiental. A capacidade de adaptação está indissoluvelmente ligada à manutenção da vida.

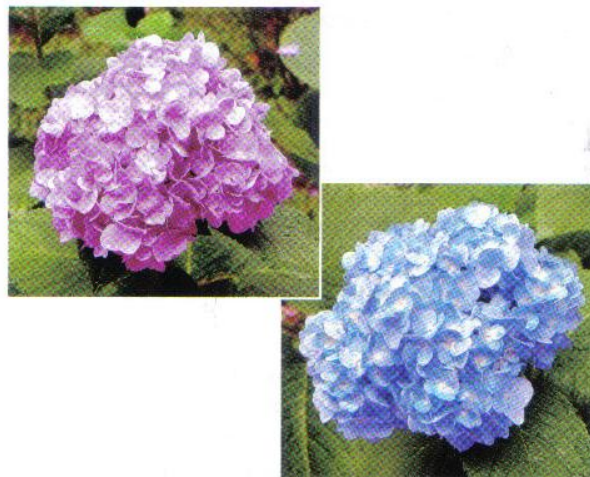
A adaptação pode ser entendida em nível de indivíduo e de espécie. No primeiro caso, ela constitui um processo de ajustamento individual conhecido como **homeostase** (do grego *homoios*, da mesma natureza, igual, e *stasis*, estabilidade), em que um organismo percebe as condições ambientais e ajusta-se a elas. No segundo, fala-se em **adaptação evolutiva**, em que uma população se ajusta ao ambiente ao longo de sucessivas gerações. Em ambos os casos, a adaptação é, em última análise, resultado da seleção natural.

Adaptação individual ou homeostase

A todo momento nosso organismo ajusta-se ao ambiente. Se a temperatura sobe, por exemplo, ficamos vermelhos e começamos a suar. A vermelhidão da pele indica que os vasos sangüíneos periféricos se dilataram, passando a irradiar mais calor, o que é auxiliado pela sudorese. Esse tipo de ajustamento, por meio de mecanismos que compensam a variação ambiental, mantém constantes determinadas funções orgânicas, permitindo adaptação ao meio.

A capacidade de dar respostas adaptativas a mudanças ambientais é importante para a sobrevivência. Por exemplo, quando viajamos para regiões situadas a mais de 3.000 m de altitude, após alguns dias o número de hemácias em nosso sangue aumenta. Isso acontece em resposta à menor disponibilidade de gás oxigênio na atmosfera: mais hemácias no sangue podem transportar mais moléculas de oxigênio, compensando a menor concentração desse gás em maiores altitudes. **(Fig. 10.20)**

Outro exemplo de adaptação individual ocorre quando uma pessoa se expõe ao sol. Após alguns dias de exposição à luz solar, a pele fica mais escura, em decorrência do aumento na síntese do pigmento melanina. Um fator ambiental, a radiação ultravioleta, põe em ação um mecanismo que intensifica a síntese de pigmento, processo comandado pelos genes. O bronzeamento da pele ilustra uma idéia importante em Biologia: o fenótipo resulta da interação entre o genótipo e o ambiente. Relembre o papel da melanina da pele humana no capítulo 12 do volume 1 desta coleção.

Grande parte dos genes é capaz de modificar sua forma de expressão conforme as condições ambientais. Geralmente o genótipo comanda não um único fenótipo, mas uma faixa de possibilidades fenotípicas que se manifestam de acordo com a influência ambiental. A capacidade de um genótipo produzir diferentes fenótipos em resposta ao ambiente é o que se denomina sua **norma de reação**. **(Fig. 10.21)**

▲ **Figura 10.21** • Norma de reação das flores de hortênsia. A cor das flores pode variar de rosa ao azulado, dependendo da acidez do solo. Solos ácidos produzem flores rosadas e solos alcalinos, flores azuladas.

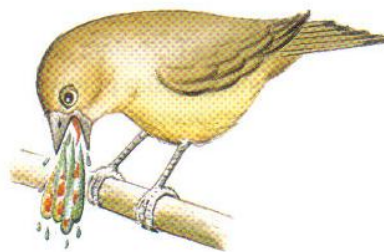
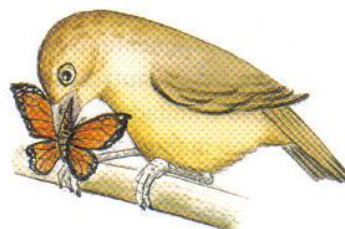
▲ **Figura 10.20** • Após permanecer por alguns dias em altitudes elevadas como em certas regiões dos Andes, o organismo humano adapta-se à menor quantidade de gás oxigênio presente no ar rarefeito, e a quantidade de hemácias em circulação no sangue aumenta. Alguns atletas treinam em altitude elevada, com o objetivo de produzir mais hemácias, para conseguir melhor desempenho em competições, mesmo ao nível do mar.

Camuflagem

Como vimos no capítulo anterior, a coloração de certas espécies de aves e de mamíferos muda em determinadas épocas do ano. Durante o longo inverno da região ártica, por exemplo, a coloração escura de muitas aves e mamíferos torna-se branca, o que constitui uma adaptação à mudança do ambiente, agora coberto de neve. No verão, a coloração desses animais volta a ser escura, ocultando-os no ambiente de cores mais escuras da estação quente. Esse exemplo marcante de adaptação, denominado **camuflagem**, pode ser definido como a propriedade de os membros de uma espécie apresentarem uma ou mais características que os assemelham ao ambiente, dificultando sua localização por espécies com as quais interage, sejam elas predadores ou presas. **(Fig. 10.22)**

▲ **Figura 10.22** • Exemplos de camuflagem. Acima, coruja do ártico com plumagem de inverno; no centro, louva-a-deus que se assemelha a uma folhagem; abaixo, bicho-folha, que se assemelha a uma folha até mesmo nas nervuras das asas.

Coloração de aviso

Algumas espécies, principalmente de insetos, anfíbios e répteis, apresentam cores e desenhos marcantes, que, ao contrário de escondê-las, destacam-nas no ambiente. Essa coloração marcante é denominada **coloração de aviso**, ou de advertência; ela funciona como proteção, alertando aos predadores que o animal que a ostenta tem sabor desagradável, é tóxico ou é perigoso, sendo melhor evitá-lo. Exemplos de organismos que ostentam coloração de aviso são borboletas de cores vivas, geralmente de sabor desagradável ou tóxicas aos seus predadores. Outros exemplos são rãs e sapos coloridos, em cuja pele há venenos poderosíssimos, e répteis peçonhentos como as cobras-corais e certos lagartos, cujo padrão de cores vivas da pele alerta sobre o perigo que representam. Um predador inexperiente ataca presas dotadas de coloração de aviso, mas logo aprende a associar a sensação ruim à cor vistosa. Mesmo que ensinar a "lição" ao predador possa custar a vida de alguns indivíduos da população, esta será beneficiada no todo. **(Fig. 10.23)**

▲ **Figura 10.23** • A coloração vistosa de certas espécies de borboletas é um alerta para os predadores sobre seu sabor desagradável ou toxicidade. Após ingerir uma borboleta monarca (*Danaus plexippus*), altamente tóxica, o pássaro predador sente-se mal e vomita; passa, então, a rejeitar borboletas que apresentem padrão de coloração semelhante ao daquela que lhe causou o mal-estar.

Mimetismo

Outro exemplo de adaptação é o **mimetismo**, em que duas espécies diferentes assemelham-se em certas características, o que constitui vantagem para uma ou para ambas em relação a uma ou mais outras espécies. No capítulo anterior usamos como exemplo de mimetismo as semelhanças entre as serpentes conhecidas como corais-verdadeiras, altamente peçonhentas, e as falsas-corais, menos perigosas que as primeiras. As falsas-corais imitadoras, por ostentar a coloração de aviso das corais-verdadeiras, beneficiam-se da "fama" dessas últimas e são evitadas por outros animais, eventualmente predadores.

No século XIX, o naturalista inglês Henry Walter Bates (1825-1892), estudando borboletas na Amazônia, teve sua atenção voltada para a grande semelhança na cor e nos desenhos das asas de espécimes de duas famílias bem distintas, Heliconiidae e Pieridae. As borboletas da família Heliconiidae são conhecidas por seu sabor extremamente desagradável aos pássaros, que aprendem a evitá-las. As borboletas da família Pieridae têm sabor agradável e são apreciadas por pássaros insetívoros. A grande semelhança visual entre essas duas espécies tão distintas pode ser explicada pela seleção natural: borboletas de sabor agradável têm vantagens seletivas em parecer-se com as borboletas de gosto ruim. Os pássaros que aprendem a evitar os espécimes dotados de coloração de aviso são iludidos pela coloração semelhante exibida pelas borboletas de sabor agradável, passando a evitá-las. Ao longo do tempo, os indivíduos da espécie de sabor agradável que apresentam alguma semelhança aos modelos tóxicos vão sendo selecionados positivamente, o que resulta em uma imitação evolutiva. Essa adaptação em que um modelo tóxico ou perigoso é imitado evolutivamente por espécies "saborosas" ou inofensivas é o que se denomina **mimetismo batesiano**.

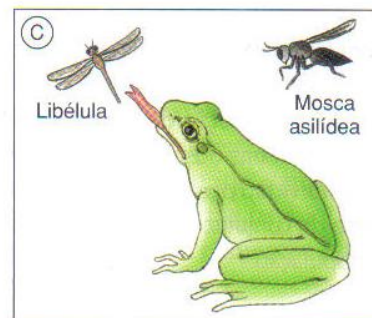
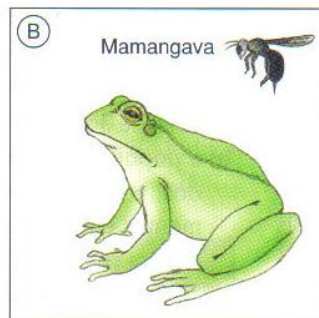
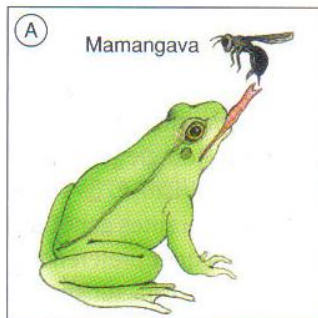
Há vários exemplos bem estudados de mimetismo batesiano em borboletas. Um deles é o da borboleta vice-rei (***Limenitis archippus***), de sabor agradável aos pássaros, que mimetiza a borboleta monarca (***Danaus plexippus***), extremamente tóxica porque suas larvas alimentam-se de plantas venenosas da família das asclepiadáceas, armazenando as toxinas vegetais em seus tecidos. As monarcas anunciam seu péssimo sabor por meio da coloração de aviso que ostentam, e é exatamente essa coloração que é imitada pelas borboletas vice-rei. **(Fig. 10.24)**

Outro exemplo interessante de mimetismo batesiano em borboletas é relativo à *Papilio dardanus*, espécie não-tóxica que se distribui amplamente na África. Os machos são muito semelhantes ao longo de toda a faixa de distribuição da espécie, mas as fêmeas ocorrem em 14 formas distintas, ou seja, são polimórficas. Por que isso ocorre? Os cientistas descobriram que, em diferentes localidades, as fêmeas de ***Papilio dardanus*** mimetizam as espécies locais de borboletas tóxicas das famílias Danaidae e Acraeidae. O polimorfismo da ***Papilio dardanus*** resulta, portanto, da adaptação da espécie a cada região, onde imita uma espécie tóxica local.

▲ **Figura 10.24** • Borboletas de sabor agradável como a vice-rei (*Limenitis archippus*) desenvolveram, por seleção natural, semelhança notável com borboletas monarcas (*Danaus plexippus*). Essa adaptação que confere proteção às imitadoras é um exemplo de mimetismo batesiano.

Os estudos mostraram que, no caso da ***Papilio dardanus***, a diversidade de formas é controlada por um único gene, com pelo menos 11 variações de alelos. Acredita-se que esse tipo de mimetismo tenha se originado devido a uma mutação de efeito marcante, que produziu um fenótipo relativamente semelhante ao do modelo, o que levou o gene mutante a ser preservado por seleção natural. Mais tarde teriam ocorrido novas mutações e seleções, que aprimoraram o mimetismo. **(Fig. 10.25)**

A hipótese de que os predadores podem associar uma sensação desagradável à coloração ou à forma da presa foi testada em um experimento no qual foram fornecidas mamangavas vivas a um lote de sapos criados em cativeiro. Assim que elas eram colocadas nas caixas dos sapos, estes tentavam capturá-las. Entretanto, ao serem ferroados, abandonavam a presa e mostravam nítidos sinais de medo. Após algumas tentativas de capturar as mamangavas, os sapos passaram a evitá-las. Em seguida, foram oferecidas aos sapos libélulas e moscas asilídeas, estas últimas muito parecidas com as mamangavas. Os sapos atacaram as libélulas, que em nada lembram as mamangavas, mas evitaram as moscas asilídeas. Aos sapos de outro lote foram fornecidas, inicialmente, mamangavas das quais haviam sido removidos os ferrões. Os sapos comeram essas mamangavas e, em seguida, as moscas asilídeas e as libélulas. **(Fig. 10.26)**

▲ **Figura 10.25** • As ilustrações à esquerda mostram três espécies de borboletas da família Danaidae, todas de sabor desagradável e coloração de aviso. À direita, fêmeas da borboleta *Papilio dardanus* que imitam cada uma das espécies à esquerda. No quadro, está representado o macho não-mimético de *Papilio dardanus*. Esse exemplo de mimetismo batesiano foi descrito originalmente por Roland Trimen, em 1869.

▲ **Figura 10.26** • Experimentos com mamangavas e moscas asilídeas que as mimetizam mostram que predadores aprendem a evitar tanto a espécie modelo como a imitadora. Depois de ser ferroado por uma mamangava (A), o sapo aprende a evitá-la (B), passando a evitar também a mosca imitadora (C). Sapos alimentados com mamangavas sem ferrão (D) não aprendem a evitá-las e comem também as moscas imitadoras (E).

Em 1864, o alemão naturalizado brasileiro Fritz Müller (1822-1897) descobriu que o fato de espécies tóxicas de borboletas serem parecidas entre si reforça a proteção de todas elas contra predadores. Isso ocorre porque os pássaros predadores "lembram-se" apenas de uma coloração de aviso a ser evitada. Se todas são parecidas, todas levam vantagem. Essa imitação evolutiva, em que um modelo tóxico ou perigoso é imitado evolutivamente por espécies igualmente tóxicas ou perigosas, foi denominada **mimetismo mülleriano**. Entre as serpentes corais-verdadeiras, todas elas peçonhentas, ocorre esse tipo de mimetismo. O fato de várias espécies de corais-verdadeiras serem parecidas reforça o aviso de que é melhor evitá-las.

10.3 Bases genéticas da evolução

A mutação origina novos alelos e a recombinação combina-os aos já existentes, originando os indivíduos geneticamente variados de uma população. A seleção natural, por sua vez, favorece os portadores de determinados conjuntos gênicos adaptativos, que tendem a sobreviver e a se reproduzir em maior escala que outros. Em conseqüência da atuação desses e de outros fatores evolutivos, a composição gênica das populações se modifica ao longo do tempo. A seguir, enfocaremos as mudanças causadas por diversos fatores evolutivos sobre a composição gênica de uma população.

O conceito de população mendeliana

Do ponto de vista genético, população é um conjunto de indivíduos que se reproduzem sexuadamente, compartilhando um patrimônio gênico comum. Essa definição, proposta em 1950 por Theodosius Dobzhansky, caracteriza o que se convencionou chamar população mendeliana, por referir-se ao seu aspecto genético. Em uma **população mendeliana**, com exceção dos gêmeos univitelinos, os indivíduos diferem uns dos outros em diversas características. Cada indivíduo possui seu conjunto gênico particular, diferente do conjunto gênico de todos os demais membros da população.

Freqüências gênicas nas populações

Vamos considerar um par de alelos, *A* e *a*. Em uma população hipotética de 10.000 indivíduos, suponhamos que 3.600 sejam homozigóticos *AA*, 1.600 sejam homozigóticos *aa* e 4.800 sejam heterozigóticos *Aa*. Nessa população, há um total de 20.000 alelos do loco gênico considerado, uma vez que cada indivíduo apresenta um par deles.

O número de alelos *A* é 12.000, pois os 3.600 indivíduos homozigóticos *AA* apresentam um total de 7.200 alelos *A*, e os 4.800 heterozigóticos *Aa* apresentam um total de 4.800 alelos *A* (7.200 + 4.800 = 12.000).

A freqüência de *A* é calculada dividindo-se o número total desse alelo (12.000) pelo número total de alelos do par considerado (20.000). Portanto, em nosso exemplo, a **freqüência de *A*** é igual a **0,6** (60%) ($f_{(A)} = 12.000 \div 20.000 = 0,6$).

A freqüência do alelo *a* pode ser calculada da mesma maneira. Os 1.600 indivíduos homozigóticos *aa* apresentam um total de 3.200 alelos *a*, e os 4.800 heterozigóticos *Aa* apresentam 4.800 alelos *a*, totalizando 8.000. Portanto, a **freqüência de *a*** é igual a **0,4** (40%) ($f_{(a)} = 8.000 \div 20.000 = 0,4$). Outra maneira de determinar a freqüência de *a* seria subtraindo a freqüência do alelo *A* do total (1), uma vez que, em uma população, a soma das freqüências dos alelos de um loco é sempre igual a 1 ($f_{(A)} + f_{(a)} = 1$) (100%) e, conseqüentemente, $f_{(a)} = 1 - f(A)$.

O princípio de Hardy-Weinberg

Em 1908, o matemático inglês Godfrey H. Hardy (1877-1947) e o médico alemão Wilhem Weinberg (1862-1937) concluíram, independentemente, que, se nenhum fator evolutivo atuar sobre uma população que satisfaça certas condições, as freqüências de seus alelos permanecerão inalteradas ao longo das gerações. Esse princípio ficou conhecido como **lei** ou **teorema de Hardy-Weinberg**, ou **princípio do equilíbrio gênico**.

As condições necessárias para que uma população se mantenha em equilíbrio gênico, segundo Hardy e Weinberg, são as seguintes:

a) a população deve ser muito grande, de modo que possam ocorrer todos os tipos de cruzamento possíveis, de acordo com as leis das probabilidades;

b) a população deve ser **panmítica** (do grego *pan*, todos, e do latim *miscere*, misturar), isto é, os cruzamentos entre os indivíduos de diferentes genótipos devem ocorrer ao acaso, sem qualquer preferência.

Uma população que reúna essas características e na qual não esteja ocorrendo nenhum fator evolutivo, tal como mutação, seleção ou migração, tende a permanecer indefinidamente em equilíbrio gênico, ou seja, as freqüências de seus alelos não sofrerão alteração ao longo das gerações.

Expressão matemática do equilíbrio gênico

Suponhamos uma população em equilíbrio gênico, na qual as freqüências dos alelos *A* e *a* não ligados ao sexo são, respectivamente, 0,8 e 0,2. Sabendo-se que cada gameta contém apenas um alelo de cada gene, conclui-se que 80% dos gametas produzidos pelos membros dessa população serão portadores do alelo *A* e que 20% serão portadores do alelo *a*.

Um indivíduo homozigótico *AA* surge quando um gameta masculino portador de um alelo *A* fecunda um gameta feminino também portador de um alelo *A*. A probabilidade de esse evento ocorrer é igual ao produto das freqüências com que ocorrem esses tipos de gameta.

Assim, a probabilidade de se formar um indivíduo *AA* em uma população com essa composição gênica é 0,64 (64%).

$$f_{(A)} \times f_{(A)} = 0,8 \times 0,8 = 0,64$$

Um indivíduo homozigótico *aa*, por sua vez, surge quando dois gametas portadores do alelo *a* se encontram. A probabilidade de esse evento ocorrer é igual ao produto das freqüências com que ocorrem esses gametas. Na população que utilizamos como exemplo, a probabilidade de se formar um indivíduo *aa* é 0,04 ou 4%.

$$f_{(a)} \times f_{(a)} = 0,2 \times 0,2 = 0,04$$

Um indivíduo heterozigótico *Aa* surge quando um gameta masculino portador do alelo *A* fecunda um gameta feminino portador de *a*, ou quando um gameta masculino portador de *a* fecunda um gameta feminino portador de *A*. A probabilidade de esses eventos ocorrerem é 0,32 (32%).

$$f_{(A)} \times f_{(a)} + f_{(a)} \times f_{(A)} = 0,8 \times 0,2 + 0,2 \times 0,8 = 0,32$$

Os geneticistas costumam chamar de *p* a freqüência de um dos alelos, e de *q* a freqüência do outro alelo. De acordo com essa notação, podemos escrever que a freqüência de indivíduos *AA* é igual a p^2, a freqüência de indivíduos *aa* é igual a q^2, e a freqüência de indivíduos heterozigóticos *Aa* é igual a $2pq$. Veja por quê:

		Freqüência dos alelos nos gametas masculinos	
		$p = f_{(A)}$	$q = f_{(a)}$
Freqüência dos alelos nos gametas femininos	$p = f_{(A)}$	$p^2 = f_{(AA)}$	$pq = f_{(Aa)}$
	$q = f_{(a)}$	$qp = f_{(aA)}$	$q^2 = f_{(AA)}$

A soma das freqüências dos diferentes genótipos será igual a 1 (100%).

$$\underset{[f_{(AA)}]}{p^2} + \underset{[f_{(Aa)} + f_{(aA)}]}{2pq} + \underset{[f_{(aa)}]}{q^2} = 1$$

O princípio de Hardy-Weinberg estabelece que, para um determinado par de alelos com freqüências *p* e *q*, em uma população mendeliana em equilíbrio, a freqüência dos diferentes genótipos em cada geração estará de acordo com a expressão $p^2 + 2pq + q^2 = 1$. No caso da população que escolhemos como exemplo, se ela estiver em equilíbrio gênico, esperaremos encontrar 64% (0,6) de indivíduos *AA*, 32% (0,32) de indivíduos *Aa* e 4% (0,04),de indivíduos *aa*.

Importância do princípio de Hardy-Weinberg

O princípio de Hardy-Weinberg estabelece um padrão teórico para o comportamento gênico ao longo das gerações. Na prática, ele é uma referência para perceber se uma população se encontra ou não em equilíbrio, chamando a atenção para os possíveis fatores evolutivos que estão atuando.

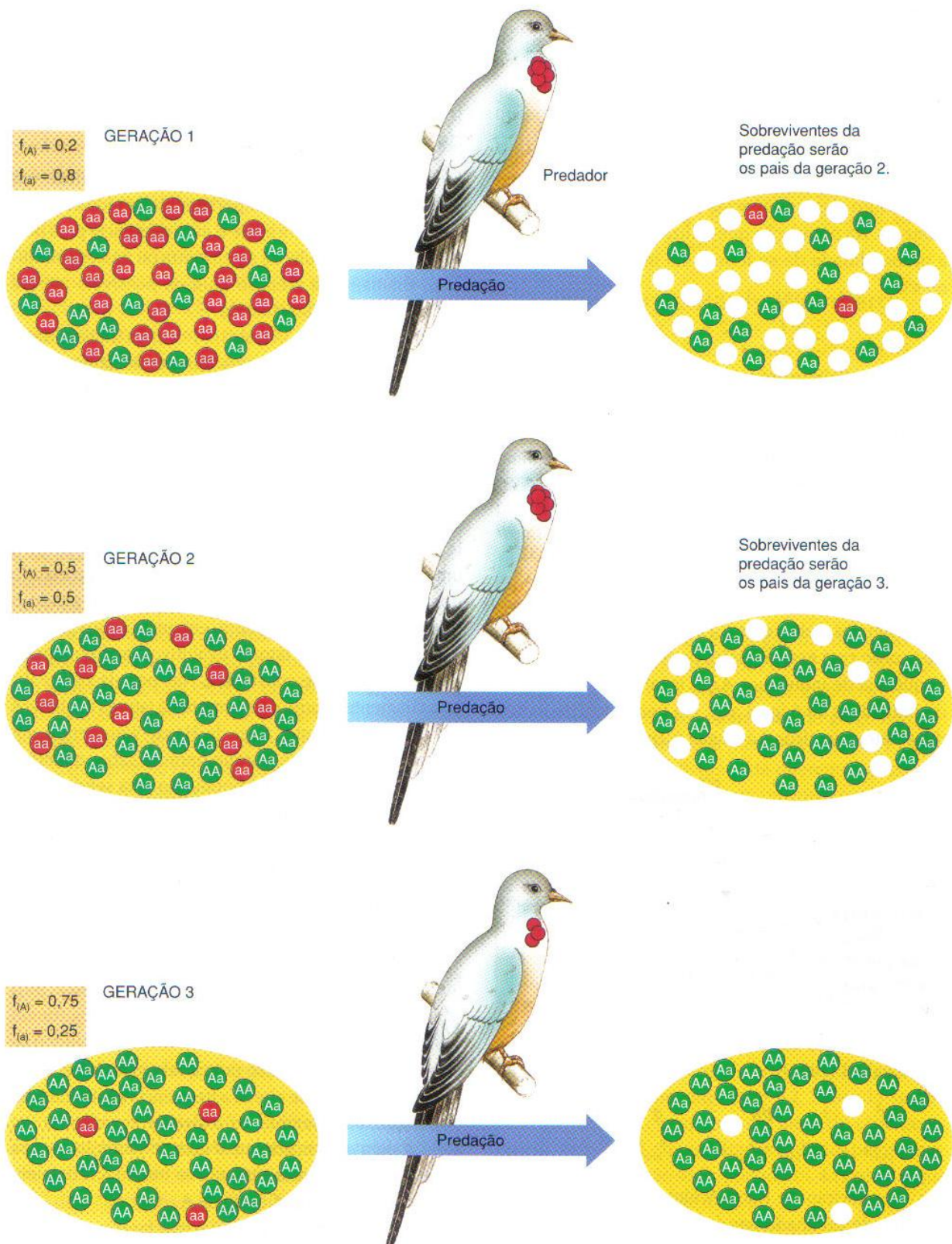
O geneticista F. J. Ayala (n. 1934), da Universidade da Califórnia (EUA), compara a importância do princípio de Hardy-Weinberg com o da primeira lei da mecânica de Newton. Segundo esta, um corpo em movimento mantém constante sua velocidade enquanto não houver intervenção de nenhuma força externa. No mundo real, raramente a velocidade dos corpos se mantém constante, uma vez que eles estão constantemente sujeitos a forças externas; apesar disso, a lei de Newton é um ponto de partida teórico importante para o estudo dos movimentos reais. De forma análoga, segundo o princípio de Hardy-Weinberg, em uma população teórica, na ausência de fatores evolutivos, as freqüências gênicas mantêm-se constantes. Nas populações reais, isso raramente ocorre, pois sempre há fatores evolutivos em ação. No entanto, a lei de Hardy-Weinberg é um parâmetro importante porque permite saber quanto e como o equilíbrio de uma população está sendo afetado pelos fatores evolutivos.

Fatores evolutivos e o equilíbrio gênico

Os principais fatores que afetam o equilíbrio gênico são a mutação, a seleção, a migração e a deriva gênica.

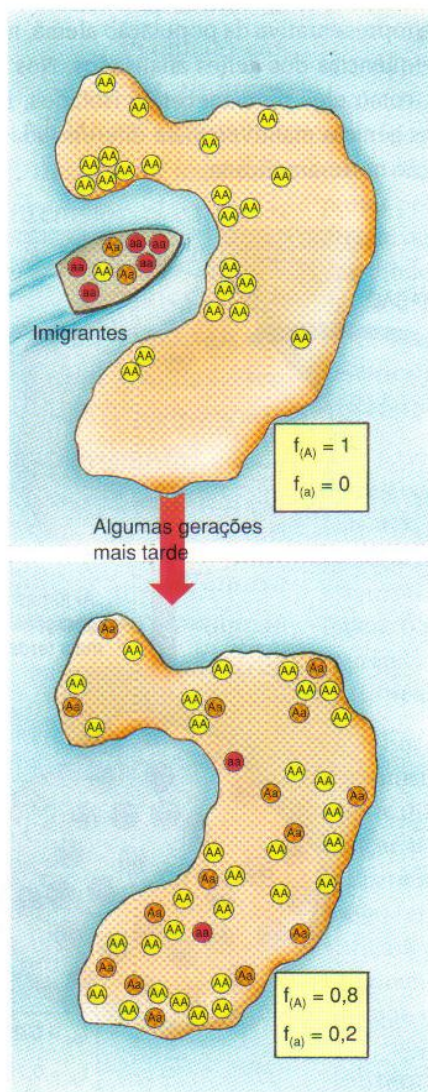
Mutação e seleção natural

A mutação, processo pelo qual um alelo se transforma em outro, pode alterar a freqüência gênica de uma população. Por exemplo, se a taxa de mutação de um alelo *A* para *a* for maior que a taxa de mutação inversa (de *a* para *A*), ocorrerá aumento na freqüência do alelo *a* e diminuição na freqüência de *A*.

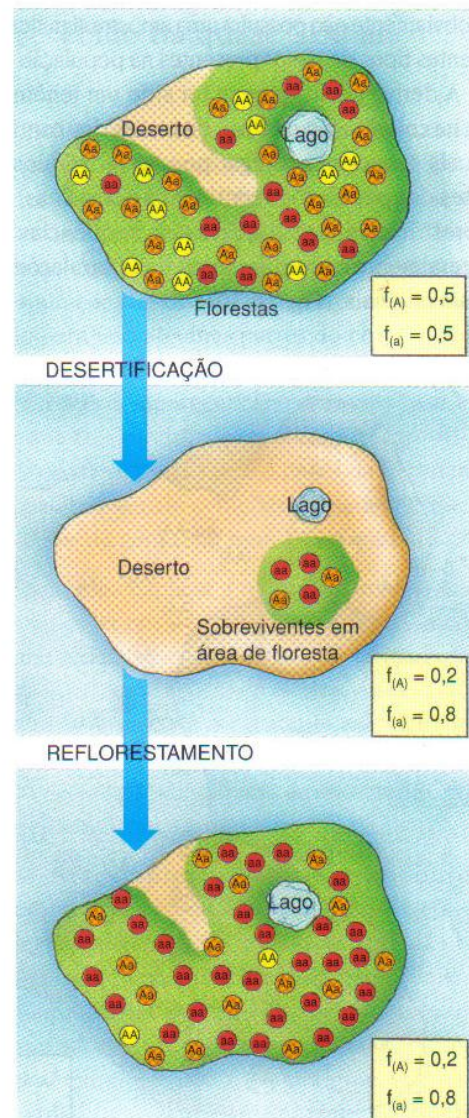
A seleção natural é o principal fator responsável pela alteração das freqüências gênicas de uma população. Ao atuar na eliminação ou preservação de determinados genótipos, a seleção altera a composição gênica das populações. **(Fig. 10.27**, na página seguinte**)**

▲ **Figura 10.27** • Se a seleção natural atuar mais intensamente sobre determinados genótipos, altera as freqüências gênicas das populações. A seqüência de ilustrações mostra como as freqüências dos alelos *A* e *a* seriam afetadas, ao longo de três gerações, se ocorresse predação apenas de indivíduos de genótipo *aa*.

Migração

Outro fator que pode afetar a composição gênica de uma população é a **migração**. Diferentes populações de uma mesma espécie nem sempre estão isoladas, o que possibilita a migração dos indivíduos. Ao incorporar-se a uma população, esses indivíduos denominam-se **imigrantes**; ao sair dela, chamam-se **emigrantes**.

Se um grupo de pessoas constituído predominantemente por pessoas de olhos azuis, por exemplo, migrar para uma região onde a maioria das pessoas tem olhos castanhos, haverá aumento da freqüência do alelo que condiciona olhos azuis na população e diminuição correspondente na freqüência do alelo que condiciona olhos castanhos. **(Fig. 10.28)**

▲ **Figura 10.28** • Representação da alteração gênica causada pela chegada de imigrantes a uma ilha. Analise, nos quadros junto a cada esquema, a freqüência gênica da população original da ilha e a freqüência que resultou da imigração.

Deriva gênica

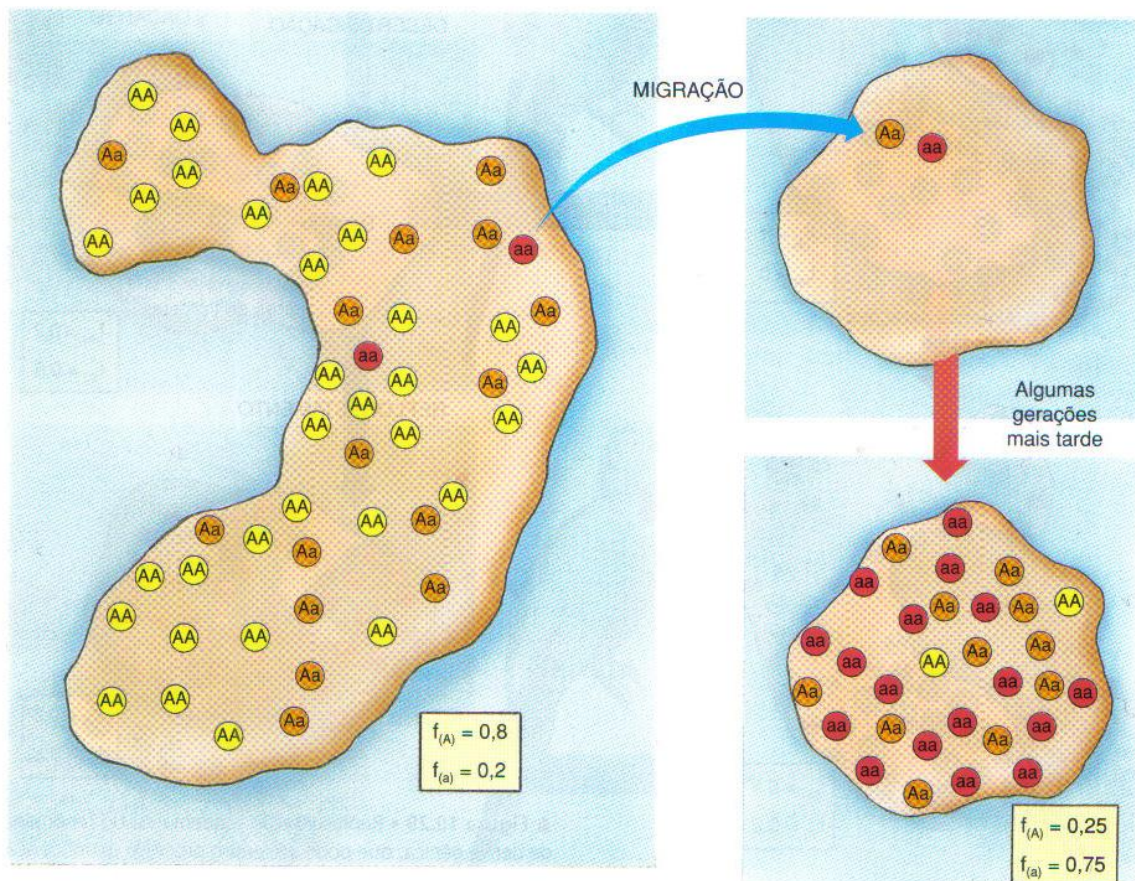
Desastres ecológicos, como incêndios florestais, inundações, desmatamentos etc., podem reduzir tão drasticamente o tamanho de uma população que os poucos sobreviventes não constituirão uma amostra representativa da população original, do ponto de vista genético. Assim, por acaso e não por adaptação ao ambiente, certos alelos podem ter sua freqüência subitamente aumentada, enquanto outros podem simplesmente desaparecer. Esse fenômeno é denominado **deriva gênica**. **(Fig. 10.29)**

▲ **Figura 10.29** • Representação esquemática do fenômeno de deriva gênica, que pode acelerar o processo de mudança evolutiva. Reduções drásticas no tamanho de uma população biológica podem alterar significativamente suas freqüências gênicas. Os sobreviventes de uma alteração climática, por exemplo, podem não representar a composição genética da população primitiva, reconstituindo novas populações às vezes muito diferentes da original.

Princípio do fundador

Um caso extremo de deriva gênica é o chamado **princípio do fundador**. Uma nova população é "fundada" por uns poucos indivíduos, seja porque a população ancestral sofreu uma diminuição drástica, seja porque um pequeno número de indivíduos de uma população migrou para outra região, onde deu origem a uma nova população.

Nessas condições, os indivíduos que iniciam a nova população, por serem poucos, não constituem uma amostra representativa da população original. Há casos em que uma única fêmea grávida funda uma nova população. Essa fêmea obviamente não possuirá uma amostra significativa dos diferentes tipos de alelos presentes na população original.

A deriva gênica parece ter sido um fenômeno comum na colonização de ilhas distantes dos continentes, às quais conseguem chegar poucos indivíduos provenientes das populações continentais. Nas ilhas, os "fundadores" iniciam populações cujas freqüências gênicas são geralmente bem diferentes das populações continentais originais. **(Fig. 10.30)**

Um exemplo do princípio do fundador na espécie humana foi verificado em comunidades religiosas originárias da Alemanha e que se estabeleceram nos Estados Unidos. Devido a seus costumes e religião, os membros dessas comunidades, chamadas Dunker, mantiveram-se isolados da população norte-americana. A análise da freqüência de alguns alelos nos membros da comunidade Dunker mostrou diferenças significativas tanto em relação à população norte-americana quanto em relação à população alemã. As diferenças de freqüência gênica na população Dunker não podem ser atribuídas a fatores seletivos ambientais, pois esses também teriam agido sobre a população norte-americana. A explicação mais plausível é que os Dunker norte-americanos, oriundos da Alemanha, não eram amostra representativa da população alemã, no tocante às freqüências dos genes analisados. Nos Estados Unidos, como eles permaneceram isolados, suas freqüências gênicas mantiveram-se diferenciadas das da população norte-americana.

▲ **Figura 10.30** • Representação esquemática do fenômeno do princípio do fundador, exemplificado pela colonização de ilhas por um ou poucos indivíduos. Os indivíduos que fundam uma nova população podem não ser representativos de seus ancestrais. O princípio do fundador permite explicar a rápida diversificação e formação de espécies novas que ocorrem em ilhas isoladas. Galápagos é um exemplo disso, como Charles Darwin observou pioneiramente.

LEITURA

GIRAFAS, MARIPOSAS E ANACRONISMOS DIDÁTICOS

Lamarck jamais deu ao exemplo das girafas o destaque que tem recebido há quase 200 anos

Ao tratar da evolução das espécies, os livros didáticos raramente deixam de usar dois exemplos clássicos: o da explicação de Lamarck para o tamanho do pescoço das girafas (e seu contraponto darwinista) e o da seleção natural em mariposas dos bosques da Inglaterra durante a Revolução Industrial

O naturalista e evolucionista francês Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829) lançou seu livro *Philosophie Zoologique* em 1809, ano do nascimento de Charles Darwin (1809-1882). Para explicar a evolução dos seres vivos, Lamarck considerou duas hipóteses: a do uso e desuso e a da transmissão dos caracteres adquiridos. Segundo essas idéias, os seres vivos seriam capazes de se adaptar a pressões impostas pelo ambiente, usando para isso algumas partes do corpo mais do que outras. As mais usadas se desenvolveriam mais; as menos usadas tenderiam a se atrofiar ou até desaparecer. Daí o nome "uso e desuso". Ele afirmava ainda que tais modificações seriam transmitidas à descendência. Até então nada se sabia sobre o papel da herança genética na transmissão de caracteres entre gerações: Gregor Mendel (1822-1884), que lançou as bases da genética, nem havia nascido.

O exemplo clássico utilizado para explicar a teoria lamarckista é o do pescoço das girafas. Costumamos ler nos livros didáticos que, segundo Lamarck, os ancestrais das girafas teriam pescoço curto. A necessidade de alcançar a copa das árvores, em especial em épocas de escassez, quando só restariam as folhas mais altas, teria provocado o constante exercício de esticar o pescoço, e essa característica — "pescoço alongado" — seria transmitida à descendência. O resultado, após milhares de anos, teria sido o que vemos hoje: girafas com pescoço longo e musculoso.

Em geral, os mesmos livros apresentam o contraponto darwinista: indivíduos nasceriam com pescoços de tamanhos ligeiramente diferentes. Os "privilegiados" teriam vantagem na hora de alcançar as folhas mais altas, o que, em épocas de escassez, seria decisivo para a sobrevivência. Assim, girafas nascidas com pescoço mais longo teriam maior chance de sobreviver e de transmitir a característica à prole. Belo e didático exemplo, não fossem alguns senões. O primeiro deles é que Lamarck jamais deu a esse exemplo o destaque que tem recebido há quase 200 anos.

Tentando achar o fio da meada

O estranho caminho seguido pelo exemplo do pescoço da girafa, de mero parágrafo a "carro-chefe" da teoria lamarckiana, foi detalhado pelo paleontólogo e divulgador da ciência Stephen Jay Gould (1941-2002)

no ensaio "The tallest tale" (alusão à expressão *tall tale*, história cujos detalhes são difíceis de engolir), publicado originalmente na *Natural History Magazine* (p. 18, maio de 1996). Nele, Gould tenta retomar o fio da meada. Observa que, na *Philosophie Zoologique*, o parágrafo sobre as girafas aparece em um capítulo onde estão muitos outros exemplos a que Lamarck possivelmente atribuiu maior importância.

Quanto a Darwin, a primeira edição do seu *A origem das espécies* (1859) não faz qualquer menção ao pescoço da girafa, mas à sua cauda! Gould especula que o pescoço da girafa teria assumido importância graças ao naturalista inglês Saint George Mivart (1827-1900), que, em crítica ao darwinismo publicada em 1871 (*The Genesis of Species*), usou esse exemplo em sua argumentação. Em reação ao ataque de Mivart, Darwin acrescentou à sexta e última edição de *A origem das espécies* (1872) um capítulo em que discorre sobre o assunto. Assim, a história ganhou os livros escolares — e em muitos deles ainda é mantida.

Entre os machos, o pescoço é uma "arma" de dominação e uma garantia da preferência das fêmeas, sendo usado em duelos às vezes fatais

Outros dados, resultantes da observação de girafas em seu hábitat (as savanas africanas), ajudam a derrubar o "conto" das folhinhas mais altas em tempos de escassez. Na verdade, a importância do tamanho e da robustez do pescoço desses animais reside em outras áreas. Entre os machos, o pescoço é uma "arma" de dominação e uma garantia da preferência das fêmeas, sendo usado em duelos às vezes fatais. As girafas também usam o pescoço como "torre de observação", para vigiar a aproximação de predadores, por exemplo. Esses dois usos já representam, segundo os cientistas, fatores relevantes para a importância do comprimento do pescoço. Darwin, aliás, os cita, ao afirmar que "a preservação de cada espécie raramente é determinada por apenas uma vantagem, mas pela associação de todas elas, grandes e pequenas". Gould fecha seu ensaio explicando que a velha história do pescoço esticado perpetuou-se talvez porque adoremos uma linda história, ainda que falsa, e talvez porque não estejamos habituados a questionar pretensas autoridades — no caso, a dos livros.

Ainda em 1996, os zoólogos Robert Simmons e Lue Scheepers publicaram o artigo "Winning by a neck: sexual selection in the evolution of giraffe" ("Vencendo por um pescoço: seleção sexual na evolução da girafa") na *American Naturalist* (148, p. 771). Segundo eles, as girafas, na estação seca, alimentam-se dos arbustos. É na estação das chuvas, quando não se espera competição, que se voltam para o alto das acácias. Observaram ainda que as fêmeas passam metade de seu tempo alimentando-se com o pescoço em posição horizontal (comportamento tão típico que permite identificar o sexo do animal a distância). Além disso, ambos os sexos alimentam-se com maior freqüência mantendo o pescoço curvado para baixo. Tudo isso, afirmam, sugere que o tamanho do pescoço não teria evoluído especificamente devido à busca de alimento em pontos mais elevados.

Para refutar a objeção de que a competição entre machos não explicaria por que as fêmeas têm pescoços longos, Simmons e Scheepers argumentam que isso resultaria da correlação genética entre os sexos, e que outras espécies exibem correlações similares. Ou seja, o pescoço longo das fêmeas teria vindo como uma espécie de "brinde".

Muito barulho por nada?

Afinal, qual é a importância de tudo isso? O lamarckismo já não foi derrubado? Sim, é um fato. Acontece que não se trata apenas de preservar a memória de um cientista.

Quando falamos em atualizar as informações em materiais de divulgação científica, cursos e livros didáticos, falamos em pôr em evidência um problema maior: o da "cristalização" de conceitos, em ciência e em outros campos. Falamos, ainda, do problema crônico da não-ventilação das informações a que professores e autores de material didático têm acesso — ambos têm formação superior, mas em geral não são cientistas.

Falamos do risco de apresentar a ciência como instância sagrada e fechada, que permanece imutável, a salvo de reavaliações e, ao mesmo tempo (como revela a história das girafas), tão vulnerável a ponto de cair em "armadilhas", pela perda da perspectiva histórica. Falamos, ainda, do comodismo de nos agarrarmos a modelos científicos que seriam excelentes, não fossem eles inconsistentes como modelos.

À luz dos conhecimentos genéticos atuais, contrapor, em um livro, a explicação de Darwin para o pescoço da girafa à de Lamarck significa ridicularizar o segundo, também evolucionista, sem levar em conta o momento histórico em que viveu. Ou seja, conduz o leitor à adesão imediata ao darwinismo, sem lhe dar chance para reflexão, por falta de maiores subsídios. É, em outras palavras, manipulação. No Brasil, isso se torna mais grave pela morosidade da divulgação, aqui, das vozes dissonantes publicadas lá fora.

As "ex-mariposas": outro exemplo clássico

A jornalista Judith Hooper lançou, em 2002, na Inglaterra (e depois nos Estados Unidos), o livro *Of moths and men* (Sobre mariposas e homens). A obra utiliza outro exemplo clássico de evolução para lançar luz sobre um tema antes restrito ao círculo dos que defendem as idéias criacionistas — mais modernamente, os teóricos do "design inteligente".

Nas aulas de Ciências e Biologia, aprendemos que o chamado "melanismo industrial" teria alterado o padrão de cor de populações de mariposas do gênero *Biston*, encontradas na região de Manchester (Inglaterra). Antes da Revolução Industrial, grande quantidade de liquens (associação entre algas e fungos) cobria as árvores das florestas habitadas por tais mariposas, conferindo aos seus troncos uma cor esbranquiçada. O padrão de cor predominante nessas mariposas, na época, era claro, e elas facilmente se confundiriam com a cor dos liquens, ao repousar sobre os troncos.

Com o advento das indústrias, a partir de 1850, o ar carregado de fuligem e outros poluentes provocou a morte dos liquens e o escurecimento dos troncos. Como resultado, a vantagem proporcionada pela cor clara teria se invertido: ao repousar sobre troncos escurecidos, as mariposas seriam avistadas facilmente por predadores (no caso, alguns pássaros). Com isso, a variedade de cor escura, de menor proporção, teria passado a predominar, graças ao fato de se camuflar nos troncos escuros e passar despercebida aos predadores.

Houve um "empurrãozinho", pois as mariposas não estavam vivas: foram coladas aos troncos

A partir de 1950, a adoção de leis de controle da emissão de poluentes inverteu novamente o padrão: troncos com novas populações de liquens, portanto mais claros, passaram a esconder melhor mariposas de cor clara. Nos livros didáticos, esse exemplo costuma vir acompanhado da descrição de uma série de experimentos do biólogo Bernard Kettlewell, da Universidade de Oxford, na década de 1950. Muitas vezes, os livros trazem fotografias que registram os experimentos (ou que reproduzem os registros originais), mostrando mariposas *Biston* claras e escuras em repouso sobre troncos de árvores. Os livros relatam que Kettlewell, nos experimentos, coletou mariposas com os dois padrões de cor e liberou-as em ambientes controlados onde havia troncos também com diferentes colorações. Ao recapturar as sobreviventes, ele teria constatado o que já se esperava: o índice de sobrevivência era diretamente relacionado ao padrão de cor dos troncos.

Tudo estaria perfeito, não fossem, como no caso das girafas, alguns senões. O primeiro foi a descoberta de que os experimentos não transcorreram exatamente como foram descritos. Houve um "empurrãozinho", pois as mariposas não estavam vivas: foram coladas aos troncos. O segundo é que o comportamento das mariposas *Biston* na natureza não se encaixa tão perfeitamente no modelo descrito. O terceiro é que a relação predomínio de uma cor/grau de poluição do ar não se manteve como o esperado.

O livro de Hooper não é o primeiro a "devassar" o caso Kettlewell. Há cinco anos, por exemplo, Michael Majerus fez o mesmo em *Melanism: evolution in action* (Melanismo: evolução em ação). Em resenha sobre esse livro, publicada na revista *Nature* (396, p. 35, 1998), Jerry Coyne, do Departamento de Ecologia e Evolução da Universidade de Chicago, compara a decepção diante da verdade sobre os experimentos de Kettlewell ao que sentiu quando criança ao saber que Papai Noel não existia.

Segundo Coyne, o livro de Majerus é o primeiro a reunir os pontos criticáveis no trabalho de Kettlewell. O mais grave é que as mariposas *Biston*, em condições naturais, provavelmente não repousam sobre troncos — em mais de 40 anos de estudos sobre seus hábitos, apenas duas foram vistas fazendo isso. O local preferido continua um mistério, mas acredita-se que seja o alto das copas das árvores. Só isso, afirma Coyne, invalidaria os experimentos, já que colocar as mariposas sobre os troncos as tornaria altamente visíveis, o que aumentaria artificialmente a predação. Além disso, Kettlewell expôs as mariposas durante o dia, quando em geral elas escolhem locais de repouso à noite.

Mas outro fator compromete a história: na verdade, o novo aumento na proporção da variedade clara ocorreu bem antes da recolonização dos troncos pelos liquens (que supostamente favoreceriam a camuflagem das mariposas claras). E mais: o aumento e depois a redução de mariposas escuras também ocorreram em áreas industriais dos Estados Unidos, onde, porém, não houve alteração na incidência de liquens — é o que relativiza bastante o papel destes na história toda.

O debate sobre usar ou não o exemplo das mariposas para fins didáticos está longe de uma solução fácil

Em resenha sobre o livro de Hooper no *The New York Times* (18 de junho de 2002), o editor de ciência Nicholas Wade compara o "empurrão" de Kettlewell a uma "piada" do grupo inglês Monty Python: as mariposas, mortas, não passavam de ex-mariposas.

E agora: descartar ou não o exemplo?

Majerus, em seu livro, admite as inúmeras falhas do modelo, mas ainda assim o considera didaticamente útil. Jerry Coyne, entretanto, pondera que esse não é o melhor exemplo a ser usado em sala de aula, devido a seus pontos fracos. Essa posição fez de Coyne, à sua revelia, uma "arma" dos criacionistas contra a teoria da evolução. Ele sugere como mais apropriado o trabalho mais recente dos ecólogos Peter e Rosemary Grant sobre a evolução do bico dos tentilhões das ilhas Galápagos — tema de um livro de leitura fácil e agradável, já traduzido para o português: *O bico do tentilhão: uma história da evolução no nosso tempo* (Rocco, 1995), do jornalista Jonathan Weiner.

A ciência não tem de ser ensinada como a arte do "jeitinho"

O debate sobre usar ou não o exemplo das mariposas para fins didáticos está longe de uma solução fácil. O biólogo evolucionário David Rudge, da Universidade Western Michigan, escreveu que manter a história no espaço escolar teria inúmeras vantagens. Enquanto Coyne diz que suas contradições inviabilizam o uso pedagógico, Rudge acredita que ela constitui excelente veículo para apresentar a estudantes o conceito de seleção natural. Para ele, expor as discrepâncias envolvidas no assunto permitiria mostrar a natureza da ciência como processo. Novamente, trata-se de uma questão delicada, na qual estão em jogo aspectos como corporativismo da comunidade científica, necessidade de controle, manipulação, de um lado, e desinformação, de outro. Como no exemplo da girafa — perfeito, didático, mas falso —, recorrer às mariposas de Manchester é tentador: permite trabalhar, de modo simples, conceitos complexos como evolução e seleção natural. Mas insistir neles é falsear informações e, de quebra, passar a alunos e professores uma idéia dogmática e nem um pouco ética da ciência. A ciência não tem de ser ensinada como a arte do "jeitinho", mas como um campo do conhecimento sujeito a falhas, aperfeiçoamentos e inesperadas complexidades diante do que parecia simples e "didático".

- **Fonte**: Isabel Rebelo Roque. Sobre girafas, mariposas, corporativismo científico e anacronismos didáticos. *Ciência Hoje*, vol. 34, n. 200, p. 64-67, 2003.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

10.1 Teoria moderna da evolução

1. O que é síntese evolucionária e qual a sua relação com a teoria sintética da evolução?
2. Em que os recentes conhecimentos genéticos afetaram a teoria da seleção natural de Darwin?

10.2 Os fatores evolutivos

3. Conceitue variabilidade gênica e explique, em poucas palavras, sua relação com a seleção natural.
4. Quais são os principais fatores responsáveis pela variabilidade gênica?
5. O que é mutação gênica e qual é sua relação com evolução biológica?
6. Como ocorrem mutações gênicas por substituição de base nitrogenada?
7. Que efeito pode ter no organismo um gene que sofreu a substituição de uma base nitrogenada?
8. Quais as conseqüências de mutações por perda ou adição de um par de nucleotídios?
9. Explique, em linhas gerais, o que é e como funciona o mecanismo de reparo do DNA.
10. O que são agentes mutagênicos? Exemplifique.
11. Explique, em linhas gerais, o que é recombinação gênica e seu papel na evolução.
12. Explique como a segregação independente dos cromossomos leva à recombinação de genes. Faça o mesmo para a permutação.

Quadro 10.1 MUTAÇÕES CROMOSSÔMICAS

13. O que são mutações (ou aberrações) cromossômicas e qual é seu papel na evolução?
14. Como podem ser classificadas as mutações cromossômicas?
15. O que são aneuploidias e euploidias? Como têm origem essas mutações cromossômicas?
16. O que são e como podem ser classificadas as mutações cromossômicas estruturais?
17. O que são inversões e translocações homozigóticas e heterozigóticas?
18. Em que consiste, segundo Darwin, a seleção natural?
19. O que significa dizer que a seleção natural implica reprodução diferencial de indivíduos de uma população?
20. Segundo a maioria dos biólogos evolucionistas da atualidade, qual é o alvo da seleção natural?
21. Quanto aos efeitos que exercem nas populações, quais são os principais tipos de seleção natural?
22. Explique por que a siclemia nas regiões onde a malária é endêmica constitui um exemplo de seleção estabilizadora.
23. O que se supõe que ocorreria com o gene da siclemia em regiões onde a malária fosse erradicada?
24. Por que o desenvolvimento de resistência aos antibióticos, por bactérias, e a inseticidas, por insetos, constitui um exemplo de seleção direcional?
25. O que é seleção disruptiva?
26. O que é seleção sexual?
27. O que é adaptação?
28. O que é norma de reação?
29. O que é camuflagem?
30. O que é coloração de aviso e qual é seu significado adaptativo?
31. Caracterize sucintamente mimetismo, distinguindo mimetismo batesiano de mimetismo mülleriano.

10.3 Bases genéticas da evolução

32. Defina população mendeliana.
33. Estime as freqüências de um par de alelos *A* e *a* em uma população de 12.000 indivíduos em que 3.600 são homozigóticos *AA*, 6.000 são heterozigóticos *Aa* e 2.400 são homozigóticos *aa*.
34. O que significa dizer que uma população está em equilíbrio gênico, ou em equilíbrio de Hardy-Weinberg? Que condições são necessárias para que uma população se mantenha em equilíbrio gênico?
35. De acordo com a expressão matemática do equilíbrio de Hardy-Weinberg, em uma população em equilíbrio gênico em que p (freqüência de A) = 0,7 e q (freqüência de a) = 0,3, quais são as freqüências esperadas, respectivamente, para os genótipos *AA*, *Aa* e *aa*?
36. Qual é a importância de um princípio teórico como o de Hardy-Weinberg?
37. Como a mutação afeta o equilíbrio gênico de uma população?
38. O que é migração e como ela pode afetar o equilíbrio gênico de uma população?
39. O que é deriva gênica?
40. O que é princípio do fundador?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

41. Os peixes conhecidos como linguados vivem, a maior parte do tempo, parados sobre a areia do fundo do mar. Como sua coloração apresenta o mesmo padrão do fundo marinho, passam despercebidos de seus predadores e também de suas presas. Trata-se de um exemplo de
a) camuflagem.
b) mimetismo.
c) seleção artificial.
d) seleção estabilizadora.
e) seleção sexual.

42. O cuco europeu coloca seus ovos no ninho de uma ave de outra espécie, deixando a ela os cuidados com o choco e a criação de seus filhotes. Como em geral os cucos são bem maiores do que as espécies que parasitam, seria esperado que seus ovos também fossem maiores do que os delas. Os ovos dos cucos, no entanto, são semelhantes aos de seus hospedeiros, não apenas em tamanho como também no padrão de coloração. Esse exemplo é ilustrativo de qual processo?
a) Camuflagem.
b) Mimetismo.
c) Seleção artificial.
d) Seleção estabilizadora.
e) Seleção sexual.

43. "A diversidade de fenótipos existente em uma população, sobre os quais atua a seleção natural, é mantida por mutação gênica e por recombinação gênica."
Essa frase resume os aspectos fundamentais
a) do criacionismo.
b) do lamarckismo.
c) do darwinismo clássico.
d) da teoria sintética de evolução.

44. "(I) geram variabilidade genética, enquanto (II) é a força responsável pelo direcionamento do processo evolutivo."
A alternativa que completa corretamente a frase é
a) (I) Mutação gênica e seleção natural; (II) recombinação gênica.
b) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) seleção natural.
c) (I) Recombinação gênica e convergência evolutiva; (II) seleção natural.
d) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) convergência evolutiva.

45. A espécie *Gallus gallus*, ancestral da galinha doméstica, vive nas florestas da Ásia. As fêmeas dessa espécie escolhem para se acasalar preferencialmente os galos de olhos brilhantes e de cristas grandes e vermelhas, características que denotam boa saúde e resistência a patógenos. Ao longo das gerações, essa escolha pelas fêmeas moldou a aparência dos machos e teve um papel ativo no favorecimento de genótipos que contribuem para a saúde da prole. Trata-se, portanto, de um exemplo de
a) camuflagem.
b) mimetismo.
c) seleção artificial.
d) seleção estabilizadora.
e) seleção sexual.

QUESTÃO DISCURSIVA

46. A análise de 800 pessoas de certa localidade revelou que 728 eram sensíveis ao PTC e 72, insensíveis. Os sensíveis são tanto pessoas homozigóticas quanto heterozigóticas e não é possível distingui-las. Os insensíveis, porém, são homozigóticos recessivos. De acordo com o princípio de Hardy-Weinberg, estime as freqüências, nessa população, dos alelos *I* e *i* e dos três genótipos: *II*, *Ii* e *ii*.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

47. (FGV-SP) Quando da divisão da célula, a fita de DNA se duplica de modo semiconservativo: a fita dupla hélice se abre e cada um dos filamentos serve de molde para a síntese de uma fita complementar. Isto assegura que as células-filhas contenham a mesma informação genética da célula-mãe. Contudo, podem ocorrer erros na incorporação de bases nitrogenadas na fita complementar (mutação). Dentre esses erros, podem-se citar:
I. substituição de uma base nitrogenada por outra;
II. adição ou deleção de uma base entre duas bases originais da seqüência.
Sobre esses dois tipos de mutação, I e II, pode-se afirmar que
a) a mutação do tipo I provoca a substituição de um único aminoácido na proteína codificada pelo gene.
b) a mutação do tipo I provoca a substituição de vários aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
c) a mutação do tipo I tem maior potencial para alterar a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
d) a mutação do tipo II altera toda a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
e) a mutação do tipo II tem maior potencial para alterar a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.

48. (Uerj) As mutações representam um importante mecanismo evolutivo para os organismos. Uma das conseqüências deste fenômeno está descrita na seguinte alternativa:
a) limitação da diversidade biológica;
b) criação de novas variantes de seres vivos;
c) extinção de espécies nocivas ao ambiente;
d) produção exclusiva de alterações benéficas.

49. (UEPB) Quem chamou a atenção para o fato de que a população humana cresce em progressão geométrica e a produção de alimentos em progressão aritmética foi
a) Mendel.
b) Malthus.
c) Darwin.
d) De Vries.
e) Lamarck.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

10.1 Teoria moderna da evolução

1. O que é síntese evolucionária e qual a sua relação com a teoria sintética da evolução?
2. Em que os recentes conhecimentos genéticos afetaram a teoria da seleção natural de Darwin?

10.2 Os fatores evolutivos

3. Conceitue variabilidade gênica e explique, em poucas palavras, sua relação com a seleção natural.
4. Quais são os principais fatores responsáveis pela variabilidade gênica?
5. O que é mutação gênica e qual é sua relação com evolução biológica?
6. Como ocorrem mutações gênicas por substituição de base nitrogenada?
7. Que efeito pode ter no organismo um gene que sofreu a substituição de uma base nitrogenada?
8. Quais as conseqüências de mutações por perda ou adição de um par de nucleotídios?
9. Explique, em linhas gerais, o que é e como funciona o mecanismo de reparo do DNA.
10. O que são agentes mutagênicos? Exemplifique.
11. Explique, em linhas gerais, o que é recombinação gênica e seu papel na evolução.
12. Explique como a segregação independente dos cromossomos leva à recombinação de genes. Faça o mesmo para a permutação.

Quadro 10.1 MUTAÇÕES CROMOSSÔMICAS

13. O que são mutações (ou aberrações) cromossômicas e qual é seu papel na evolução?
14. Como podem ser classificadas as mutações cromossômicas?
15. O que são aneuploidias e euploidias? Como têm origem essas mutações cromossômicas?
16. O que são e como podem ser classificadas as mutações cromossômicas estruturais?
17. O que são inversões e translocações homozigóticas e heterozigóticas?
18. Em que consiste, segundo Darwin, a seleção natural?
19. O que significa dizer que a seleção natural implica reprodução diferencial de indivíduos de uma população?
20. Segundo a maioria dos biólogos evolucionistas da atualidade, qual é o alvo da seleção natural?
21. Quanto aos efeitos que exercem nas populações, quais são os principais tipos de seleção natural?
22. Explique por que a siclemia nas regiões onde a malária é endêmica constitui um exemplo de seleção estabilizadora.
23. O que se supõe que ocorreria com o gene da siclemia em regiões onde a malária fosse erradicada?
24. Por que o desenvolvimento de resistência aos antibióticos, por bactérias, e a inseticidas, por insetos, constitui um exemplo de seleção direcional?
25. O que é seleção disruptiva?
26. O que é seleção sexual?
27. O que é adaptação?
28. O que é norma de reação?
29. O que é camuflagem?
30. O que é coloração de aviso e qual é seu significado adaptativo?
31. Caracterize sucintamente mimetismo, distinguindo mimetismo batesiano de mimetismo mülleriano.

10.3 Bases genéticas da evolução

32. Defina população mendeliana.
33. Estime as freqüências de um par de alelos *A* e *a* em uma população de 12.000 indivíduos em que 3.600 são homozigóticos *AA*, 6.000 são heterozigóticos *Aa* e 2.400 são homozigóticos *aa*.
34. O que significa dizer que uma população está em equilíbrio gênico, ou em equilíbrio de Hardy-Weinberg? Que condições são necessárias para que uma população se mantenha em equilíbrio gênico?
35. De acordo com a expressão matemática do equilíbrio de Hardy-Weinberg, em uma população em equilíbrio gênico em que p (freqüência de A) = 0,7 e q (freqüência de a) = 0,3, quais são as freqüências esperadas, respectivamente, para os genótipos *AA*, *Aa* e *aa*?
36. Qual é a importância de um princípio teórico como o de Hardy-Weinberg?
37. Como a mutação afeta o equilíbrio gênico de uma população?
38. O que é migração e como ela pode afetar o equilíbrio gênico de uma população?
39. O que é deriva gênica?
40. O que é princípio do fundador?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

41. Os peixes conhecidos como linguados vivem, a maior parte do tempo, parados sobre a areia do fundo do mar. Como sua coloração apresenta o mesmo padrão do fundo marinho, passam despercebidos de seus predadores e também de suas presas. Trata-se de um exemplo de
a) camuflagem.
b) mimetismo.
c) seleção artificial.
d) seleção estabilizadora.
e) seleção sexual.

42. O cuco europeu coloca seus ovos no ninho de uma ave de outra espécie, deixando a ela os cuidados com o choco e a criação de seus filhotes. Como em geral os cucos são bem maiores do que as espécies que parasitam, seria esperado que seus ovos também fossem maiores do que os delas. Os ovos dos cucos, no entanto, são semelhantes aos de seus hospedeiros, não apenas em tamanho como também no padrão de coloração. Esse exemplo é ilustrativo de qual processo?
a) Camuflagem.
b) Mimetismo.
c) Seleção artificial.
d) Seleção estabilizadora.
e) Seleção sexual.

43. "A diversidade de fenótipos existente em uma população, sobre os quais atua a seleção natural, é mantida por mutação gênica e por recombinação gênica."
Essa frase resume os aspectos fundamentais
a) do criacionismo.
b) do lamarckismo.
c) do darwinismo clássico.
d) da teoria sintética de evolução.

44. "(I) geram variabilidade genética, enquanto (II) é a força responsável pelo direcionamento do processo evolutivo."
A alternativa que completa corretamente a frase é
a) (I) Mutação gênica e seleção natural; (II) recombinação gênica.
b) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) seleção natural.
c) (I) Recombinação gênica e convergência evolutiva; (II) seleção natural.
d) (I) Mutação gênica e recombinação gênica; (II) convergência evolutiva.

45. A espécie *Gallus gallus*, ancestral da galinha doméstica, vive nas florestas da Ásia. As fêmeas dessa espécie escolhem para se acasalar preferencialmente os galos de olhos brilhantes e de cristas grandes e vermelhas, características que denotam boa saúde e resistência a patógenos. Ao longo das gerações, essa escolha pelas fêmeas moldou a aparência dos machos e teve um papel ativo no favorecimento de genótipos que contribuem para a saúde da prole. Trata-se, portanto, de um exemplo de
a) camuflagem.
b) mimetismo.
c) seleção artificial.
d) seleção estabilizadora.
e) seleção sexual.

QUESTÃO DISCURSIVA

46. A análise de 800 pessoas de certa localidade revelou que 728 eram sensíveis ao PTC e 72, insensíveis. Os sensíveis são tanto pessoas homozigóticas quanto heterozigóticas e não é possível distingui-las. Os insensíveis, porém, são homozigóticos recessivos. De acordo com o princípio de Hardy-Weinberg, estime as freqüências, nessa população, dos alelos *I* e *i* e dos três genótipos: *II*, *Ii* e *ii*.

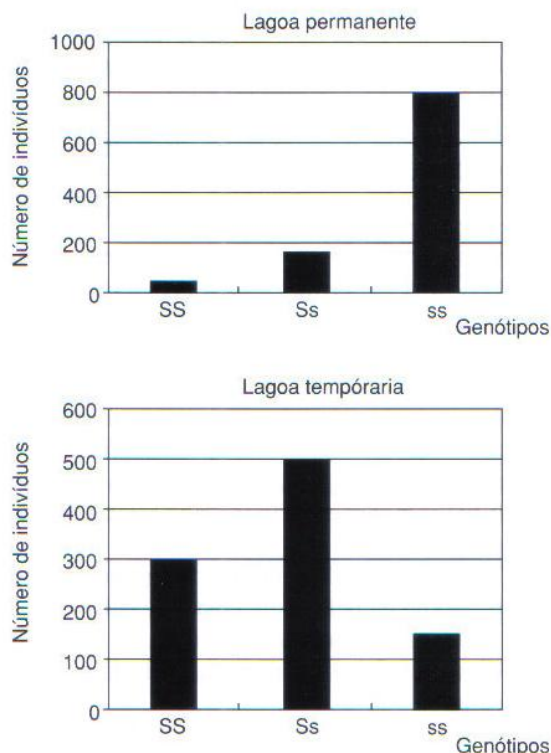
A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

47. (FGV-SP) Quando da divisão da célula, a fita de DNA se duplica de modo semiconservativo: a fita dupla hélice se abre e cada um dos filamentos serve de molde para a síntese de uma fita complementar. Isto assegura que as células-filhas contenham a mesma informação genética da célula-mãe. Contudo, podem ocorrer erros na incorporação de bases nitrogenadas na fita complementar (mutação). Dentre esses erros, podem-se citar:
I. substituição de uma base nitrogenada por outra;
II. adição ou deleção de uma base entre duas bases originais da seqüência.
Sobre esses dois tipos de mutação, I e II, pode-se afirmar que
a) a mutação do tipo I provoca a substituição de um único aminoácido na proteína codificada pelo gene.
b) a mutação do tipo I provoca a substituição de vários aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
c) a mutação do tipo I tem maior potencial para alterar a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
d) a mutação do tipo II altera toda a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.
e) a mutação do tipo II tem maior potencial para alterar a composição de aminoácidos na proteína codificada pelo gene.

48. (Uerj) As mutações representam um importante mecanismo evolutivo para os organismos. Uma das conseqüências deste fenômeno está descrita na seguinte alternativa:
a) limitação da diversidade biológica;
b) criação de novas variantes de seres vivos;
c) extinção de espécies nocivas ao ambiente;
d) produção exclusiva de alterações benéficas.

49. (UEPB) Quem chamou a atenção para o fato de que a população humana cresce em progressão geométrica e a produção de alimentos em progressão aritmética foi
a) Mendel.
b) Malthus.
c) Darwin.
d) De Vries.
e) Lamarck.

50. (UFMG) Analise estes gráficos, em que estão representadas populações de insetos com três tipos de genótipos e fenótipos — insetos com asas longas (**SS**), insetos com asas curtas (**Ss**) e insetos sem asas (**ss**) — em dois ecossistemas diferentes — lagoa permanente e lagoa temporária:

Considerando-se as informações contidas nesses gráficos, é CORRETO afirmar que a seleção natural

a) atua favorecendo fenótipos diferentes nas duas lagoas.
b) aumenta a probabilidade de os insetos SS deixarem descendentes nas duas lagoas.
c) favorece os indivíduos heterozigotos na lagoa permanente.
d) impede os cruzamentos de homozigotos recessivos na lagoa temporária.

51. (Ufes) Os pesquisadores Robert Simmons e Lue Scheepers questionaram a visão tradicional de como a girafa desenvolveu um pescoço comprido. Observações feitas na África demonstraram que as girafas, que atingem alturas de 4 a 5 metros, geralmente se alimentam de folhas a 3 metros do solo. O pescoço comprido é usado como uma arma nos combates corpo a corpo pelos machos na disputa por fêmeas. As fêmeas também preferem acasalar com machos de pescoço grande. Esses pesquisadores argumentam que o pescoço da girafa ficou grande devido à seleção sexual: machos com pescoços mais compridos deixavam mais descendentes do que machos com pescoços mais curtos.

(Simmons and Scheepers, *Americam Naturalist* Vol. 148: pp. 771-786. Adaptado)

Sobre a visão tradicional de como a girafa desenvolve um pescoço comprido, é CORRETO afirmar que

a) na visão tradicional baseada em Darwin, a girafa adquire o pescoço comprido pela lei de uso e desuso. As girafas que esticam seus pescoços geram uma prole que já nasce de pescoço mais comprido, e, cumulativamente, através das gerações, o pescoço, em média, aumenta de tamanho.
b) na visão tradicional baseada em Lamarck, a girafa adquire o pescoço comprido com a sobrevivência diferencial de girafas. Aquelas com o pescoço comprido conseguem se alimentar de folhas inacessíveis às outras e deixam, portanto, mais descendentes.
c) na visão tradicional baseada em Lamarck, a girafa adquire o pescoço comprido pela lei de uso e desuso. Aquelas com o pescoço comprido conseguem se alimentar de folhas inacessíveis às outras e deixam, portanto, mais descendentes.
d) na visão tradicional baseada em Darwin, a girafa adquire o pescoço comprido com a sobrevivência diferencial de girafas. Aquelas com o pescoço comprido conseguem se alimentar de folhas inacessíveis às outras e deixam, portanto, mais descendentes.
e) na visão tradicional baseada em Darwin, a girafa adquire o pescoço comprido com a sobrevivência diferencial de girafas. As girafas que esticam seus pescoços geram uma prole que já nasce de pescoço mais comprido, e, cumulativamente, através das gerações, o pescoço, em média, aumenta de tamanho.

52. (Uespi) No desenvolvimento da resistência bacteriana a antibióticos usados em larga escala, e da resistência de moscas a inseticidas, a própria droga provoca a eliminação dos portadores de genótipos sensíveis, favorecendo a proliferação de genótipos resistentes. Estes casos são decorrentes da atuação de

a) migração gênica.
b) mutação genética.
c) seleção direcional.
d) oscilação genética.
e) especiação.

(Uespi) Responda às questões 53 e 54 considerando a população abaixo:

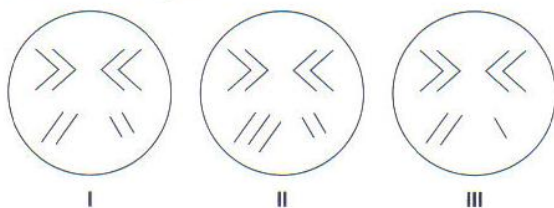
Genótipo	Número de indivíduos	Característica
AA	8.000	Normal
Aa	10.000	Normal
aa	2.000	Albino

53. A freqüência do gene "A" nesta população é de

a) 75%
b) 90%
c) 50%
d) 35%
e) 65%

54. A freqüência de indivíduos albinos nesta população é de

a) 0,1%
b) 20%
c) 10%
d) 0,2%
e) 0,01%

55. (UFS-SE) Em determinado organismo foram encontradas células somáticas normais (I) e células aberrantes (II e III). Os três cariótipos dessas células estão esquematizados a seguir.

As aberrações cromossômicas de II e III são, respectivamente, casos de

a) poliploidia e monossomia.
b) monossomia e trissomia.
c) monossomia e poliploidia.
d) trissomia e poliploidia.
e) trissomia e monossomia.

56. (UFMS) Assinale a(s) alternativa(s) que enquadre(m) a(s) população(ões) no equilíbrio de *Hardy-Weinberg*.

	População	Genótipo		
		VV	Vv	vv
a)	A	0,49	0,42	0,09
b)	B	0,42	0,49	0,09
c)	C	0,60	0,20	0,20
d)	D	0,16	0,35	0,49
e)	E	0,25	0,50	0,25
f)	F	0,36	0,48	0,16

57. (Fatec-SP) Sabendo-se que em determinada população em equilíbrio a freqüência de um gene autossômico recessivo é de 30%, a freqüência de homozigotos dominantes e de heterozigotos será, respectivamente

a) 9% e 42%
b) 70% e 21%
c) 49% e 9%
d) 49% e 21%
e) 49% e 42%

58. (FGV-SP) Sabe-se que o casamento consangüíneo, ou seja, entre indivíduos que são parentes próximos, resulta numa maior freqüência de indivíduos com anomalias genéticas. Isso pode ser justificado pelo fato de os filhos apresentarem

a) maior probabilidade de heterozigozes recessivas.
b) maior probabilidade de homozigozes recessivas.
c) menor probabilidade de heterozigozes dominantes.
d) menor probabilidade de homozigozes dominantes.
e) menor probabilidade de homozigozes recessivas.

59. (Uespi) Em 1908, os cientistas Hardy e Weinberg formularam um teorema cuja importância está no fato de ele estabelecer um modelo para o comportamento dos genes nas populações naturais. Se os valores das freqüências gênicas de uma população, observada ao longo de gerações, forem significativamente diferentes dos valores esperados através da aplicação do teorema, pode-se concluir corretamente que:

a) a população estudada é infinitamente grande, inviabilizando a aplicação do teorema.
b) não houve a atuação dos fatores evolutivos sobre a população.
c) a população encontra-se em equilíbrio genético.
d) a população está evoluindo, uma vez que as freqüências gênicas foram alteradas.
e) os cruzamentos nessa população ocorrem ao acaso.

60. (PUC-SP) Uma mulher triplo-X é fértil e produz óvulos normais e óvulos com dois cromossomos X.
Sendo casada com um homem cromossomicamente normal, essa mulher terá chance de apresentar

a) apenas descendentes cromossomicamente normais.
b) apenas descendentes cromossomicamente anormais.
c) 50% dos descendentes cromossomicamente normais e 50% cromossomicamente anormais.
d) 25% dos descendentes cromossomicamente normais e 75% cromossomicamente anormais.
e) 75% dos descendentes cromossomicamente normais e 25% cromossomicamente anormais.

QUESTÕES DISCURSIVAS

61. (Unicamp-SP) Desde 1995 alguns estados norte-americanos estão excluindo o ensino da teoria de evolução biológica dos seus currículos escolares alegando, entre outras razões, que ninguém estava presente quando a vida surgiu na Terra. Alguns cientistas defendem a teoria da evolução argumentando que, se é necessário "ver para crer", então não poderemos acreditar na existência dos átomos, pois estes também não podem ser vistos.

(Adaptado de *ISTO É*, 25/08/1999.)

a) Apresente três evidências que apóiam a teoria da evolução biológica.
b) A mutação gênica é considerada um dos principais fatores evolutivos. Por quê?

62. (Unesp)

Darwin ajuda luta contra AIDS

Charles Darwin aprovaria. O novo tratamento contra a AIDS, em desenvolvimento na Universidade Harvard, promete um raro avanço no combate à doença. Mas, melhor ainda, pela primeira vez uma terapia está levando a sério a teoria da evolução darwiniana, baseada no princípio da seleção natural (...). A equipe da Universidade resolveu testar o que aconteceria se uma população de vírus fosse submetida a várias drogas, AZT, DDI e Piridinona, que atacassem o mesmo alvo.

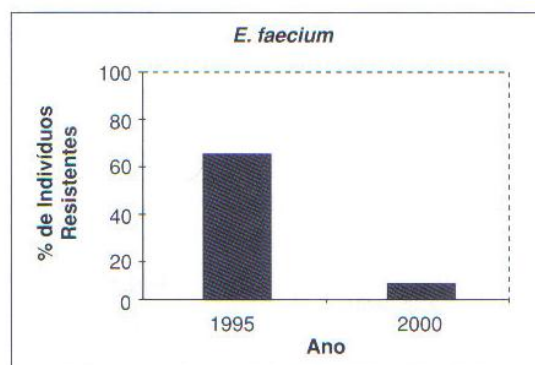
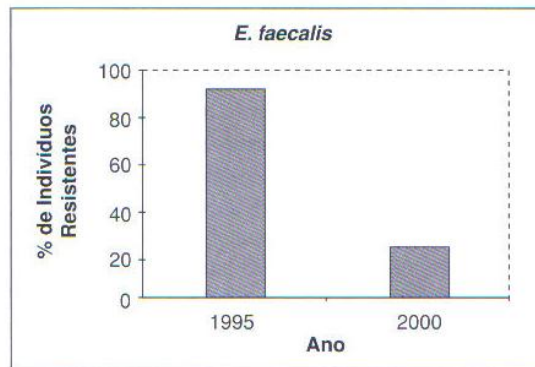
O alvo é a enzima transcriptase reversa, que o HIV usa (...) para integrar seu genoma ao da célula infectada. (...). O resultado foi revolucionário (...), o vírus acabou perdendo a capacidade de se multiplicar. (...). O tratamento só é eficaz quando as drogas são ministradas conjuntamente (...)

(*Folha de S.Paulo*, 28.02.1993.)

Lembre-se de que cada droga reconhece e atua sobre uma região específica da enzima transcriptase reversa, e que as enzimas dependem de sua composição de aminoácidos e estrutura espacial para exercer sua função.

a) Do ponto de vista evolutivo, e considerando a ação da seleção, explique o que ocorreria com a população viral se fosse utilizada uma única droga.

b) Por que o tratamento só se mostrou eficaz com a administração conjunta das três drogas?

63. (UFRJ) Visando a prevenir infecções, a adição de antibióticos na ração de animais domésticos tornou-se prática comum em muitos países. Ao longo dos anos, observou-se um aumento na porcentagem de bactérias que possuem genes que as tornam resistentes aos antibióticos, em detrimento das bactérias sensíveis. A partir de 1998, o governo da Dinamarca proibiu o uso de antibióticos na ração de animais. Os gráficos a seguir mostram a porcentagem de indivíduos resistentes a antibióticos nas bactérias *Enterococcus fecalis* e *Enterococcus faecium* encontradas no trato digestivo de animais dinamarqueses nos anos de 1995 e 2000.

Explique por que ocorre variação na porcentagem de bactérias resistentes a antibióticos entre os anos de 1995 e 2000.

▲ **Figura 11.1** • Representação gráfica das relações entre a anagênese e a cladogênese no processo evolutivo.

A maioria dos evolucionistas admite que a especiação por diversificação é a base da diversidade biológica existente no planeta. No entanto, o modo como as transformações evolutivas dentro de uma espécie, isto é, a microevolução, se relacionam com a origem dos grupos taxonômicos mais abrangentes — gêneros, famílias, ordens etc. — ainda é um mistério, com grandes questões a serem esclarecidas. Os processos que levam à diversificação das categorias superiores à espécie na hierarquia taxonômica, e que continuam a ser motivo de controvérsia entre os cientistas, constituem a **macroevolução**.

Gradualismo e equilíbrio pontuado

Darwin pensava que a evolução ocorria de modo lento e contínuo, com os seres vivos adaptando-se gradualmente aos ambientes. Essa idéia, conhecida como **gradualismo filético**, ou apenas gradualismo, dominou o pensamento evolutivo por muitas décadas. Hoje, no entanto, muitos cientistas admitem que, em certos casos, grandes mudanças evolutivas podem acontecer de modo relativamente rápido.

Dois fatos levaram alguns cientistas a questionar o gradualismo. Primeiro: o documentário fóssil não mostra uma sucessão de mudanças graduais dos fósseis mais antigos para os mais recentes, como seria esperado. Embora exista sucessão de mudanças graduais de fósseis em alguns casos, o registro mostra grande descontinuidade, com novas variedades parecendo surgir de repente, ao longo do tempo evolutivo. Os defensores do gradualismo argumentam que isso se deve ao fato de o próprio registro fóssil ser incompleto, uma vez que a fossilização é um evento relativamente raro, como já comentamos. Outros, porém, acham que não é só isso. Para eles, o documentário fóssil mostra o que realmente aconteceu: a evolução não se processaria apenas de forma gradual.

Um segundo argumento contra o gradualismo é a existência de tantas espécies diferentes atualmente. Se tivesse ocorrido apenas evolução gradual e constante, não deveríamos esperar mais semelhanças e intergradações entre os seres vivos? Embora muitas espécies apresentem semelhanças, ainda assim cada uma delas é única, possuindo características que a distinguem de outras espécies. Notam-se, portanto, descontinuidades no mundo vivo, que se traduzem na biodiversidade.

Em 1972, os paleontologistas norte-americanos Niles Eldredge (n.1944) e Stephen Jay Gould (1941-2002) formularam a teoria do **equilíbrio pontuado**. Segundo eles, as populações passam longos períodos evoluindo lentamente, sem alterações expressivas em suas características, seguidos por períodos rápidos de grandes mudanças. Nas fases evolutivas de poucas mudanças, denominadas **estases** (do latim *stasis*, estabilidade), que poderiam durar milhões de anos, estaria em atividade a seleção estabilizadora, que tende a conservar as características de populações bem adaptadas ao ambiente. De tempos em tempos, populações dessas espécies originariam linhagens novas (clados), que se diferenciariam "rapidamente" em novas espécies. Essa "rapidez" seria da ordem de algumas dezenas de milhares de anos ou mais, intervalos considerados curtos na escala do tempo geológico.

Os defensores da teoria do equilíbrio pontuado dizem que, além de explicar a descontinuidade do documentário fóssil, o modelo também explica a existência de organismos atuais que são verdadeiros "fósseis vivos", denominados **rélicos** (do latim *reliquus*, que resta, remanescente), como os celacantos (*Latimeria*), os caranguejos-ferradura (*Limulus*), as cicas (*Cycas*) e a gincobiloba (*Ginkgo biloba*), entre outros. Como vimos no volume 2 desta coleção, esses organismos assemelham-se muito a fósseis datados de milhões de anos atrás. De acordo com a teoria do equilíbrio pontuado, espécies como essas estariam bem adaptadas aos seus ambientes há muito tempo, encontrando-se em um longo período de estase. Nesses milhões de anos em que essas espécies se mantiveram estáveis, é possível que algumas de suas populações tenham se diversificado e originado outras espécies, muitas delas existentes até os dias de hoje.

11.2 A origem de novas espécies

O conceito de espécie biológica

A formação de novas espécies de seres vivos, denominada **especiação**, é uma etapa fundamental do processo evolutivo. Embora tenha dado à sua principal obra o título *A origem das espécies*, o próprio Darwin tinha dúvidas a respeito do que seria uma espécie biológica. Relembre o conceito de espécie no contexto da classificação, no capítulo 1 do volume 2 desta coleção.

O termo "espécie" vem do latim *species* e significa tipo, qualidade. É empregado na linguagem cotidiana tanto para designar organismos vivos como coisas não-vivas. No século XVIII, o biólogo sueco Carl von Linneé, Lineu (1707-1778), empregou pioneiramente o termo espécie para designar cada conjunto de seres vivos em que os indivíduos têm grandes semelhanças físicas, apresentando um padrão morfológico comum e típico do grupo.

A idéia de haver um padrão bem definido e típico de cada espécie é o que se denomina **conceito tipológico de espécie**, largamente aceito pelos naturalistas até o início do século XX. Em alguns casos, esse conceito ainda é empregado; por exemplo, em concursos de animais, utilizam-se vários critérios morfológicos para escolher o vencedor, que seria o representante mais típico de uma raça ou espécie.

O conceito tipológico de espécie apresenta um grande problema: qual é o grau mínimo de semelhança entre dois organismos para que eles possam ser considerados de mesma espécie? Por exemplo, será que entre um cão são-bernardo e um chiuaua há diferenças suficientes para considerá-los duas espécies distintas? Ou será que entre um cão pastor e um lobo há semelhanças suficientemente grandes para classificá-los na mesma espécie?

Em 1942, Ernst Mayr (n. 1904) propôs uma definição de espécie válida até hoje, apesar de suas limitações. Nessa definição, *espécie é um grupo de populações cujos indivíduos são capazes de se cruzar e produzir descendentes férteis, em condições naturais, estando reprodutivamente isolados de indivíduos de outras espécies.*

Observe que o critério fundamental da definição de Mayr não é a morfologia, mas a capacidade de cruzamento entre seres de mesma espécie e a sua incapacidade de se cruzar com seres de outras espécies. Mesmo que pertençam a populações geograficamente isoladas, os membros de uma espécie serão capazes de se cruzar e produzir descendência fértil se forem reunidos em condições naturais. **(Fig. 11.2)**

O conceito de espécie proposto por Mayr tem limitações. Ele não se aplica, por exemplo, a espécies que se reproduzem assexuadamente, como bactérias, vírus e certas espécies de outros grupos. Embora esses seres possam apresentar processos de mistura de material genético, não há reprodução sexuada como nos organismos eucarióticos. Nesses casos, a classificação deve adotar critérios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e genéticos, na tentativa de estabelecer as diferenças entre os grupos e as possíveis relações de parentesco entre eles.

▲ **Figura 11.2** • Cães de raças distintas são capazes de se cruzar e produzir descendentes férteis. Apesar de as diferenças de tamanho limitarem certos cruzamentos entre raças, os cruzamentos intermediários possibilitam, potencialmente, que alelos originalmente surgidos em um cão Golden Retviever possam se reunir aos de um Chiuaua. Na foto, da esquerda para a direita, cães das raças Basset Hound, Golden Retviever e Chiuaua.

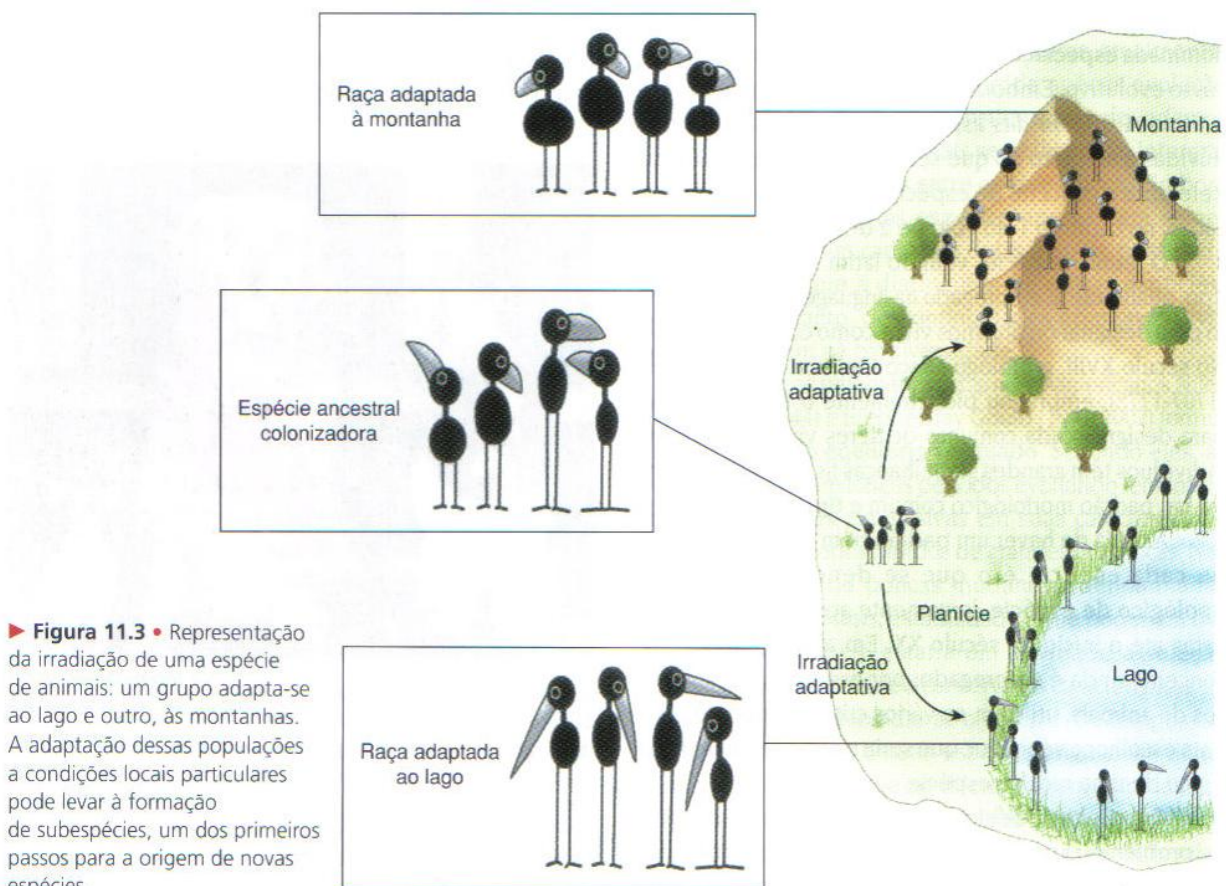
O significado biológico da espécie

O conceito de espécie é um dos mais importantes em Biologia. A espécie biológica é uma **unidade reprodutiva**, ou seja, seus membros cruzam-se entre si, mas não se cruzam com membros de outras espécies. A espécie é também uma **unidade ecológica**, com características próprias e que mantém relações bem definidas com o ambiente e com outras espécies. Ela é também uma **unidade genética**, pois possui um patrimônio gênico característico, que, em condições naturais, não se mistura com o de outras espécies, evoluindo independentemente.

É justamente o fato de as espécies serem entidades reprodutivamente isoladas que lhes possibilita acumular mutações favoráveis e reunir as melhores combinações gênicas possíveis, seguindo, cada uma, um caminho evolutivo próprio e diferenciando-se de outras espécies. Portanto, nos seres com reprodução sexuada, poderíamos acrescentar mais um atributo à espécie: ela é uma **unidade evolutiva**, com suas populações adaptando-se ao ambiente e desenvolvendo sua estratégia única de sobrevivência.

O conceito de subespécie

Subespécies, ou **raças**, são populações de mesma espécie que diferem entre si quanto a determinadas características. Por exemplo, na planície cortada pelo Rio Tana, no Quênia, vivem duas subespécies de girafa (*Giraffa camelopardalis rotschildi* e *Giraffa camelopardalis reticulada*), que apresentam várias características distintas; em seu hábitat natural, o cruzamento entre elas é raro, mas em cativeiro ocorre com facilidade. É justamente o fato de duas subespécies não se cruzarem ou se cruzarem com freqüência muito baixa que as mantém distintas. Na natureza, a dificuldade de cruzamento é geralmente imposta pelo fato de as subespécies estarem geograficamente isoladas. Quando elas entram em contato e seus membros passam a cruzar-se livremente, as diferenças raciais tendem a desaparecer, devido à mistura dos genes.

A formação das subespécies ocorre, geralmente, por um processo denominado *irradiação adaptativa*. Este consiste no isolamento geográfico de populações de uma mesma espécie, as quais vão se tornando geneticamente diferentes; isso ocorre devido ao acúmulo de mutações novas e à seleção de diferentes combinações gênicas, imposta pelas condições em cada uma das regiões. Pelo fato de estarem relativamente isoladas, adaptadas a ambientes particulares, as subespécies tendem a manter e a acentuar sua identidade. A formação de subespécies representa uma etapa de transição na origem de novas espécies, como veremos adiante. **(Fig. 11.3)**

▶ **Figura 11.3** • Representação da irradiação de uma espécie de animais: um grupo adapta-se ao lago e outro, às montanhas. A adaptação dessas populações a condições locais particulares pode levar à formação de subespécies, um dos primeiros passos para a origem de novas espécies.

Processos de especiação

Os cientistas acreditam que, na história evolutiva da vida, as espécies surgem normalmente por cladogênese, isto é, por diversificação de uma espécie ancestral. Seguindo essa linha, os biólogos distinguem dois tipos de processos de especiação: especiação alopátrica e especiação simpátrica.

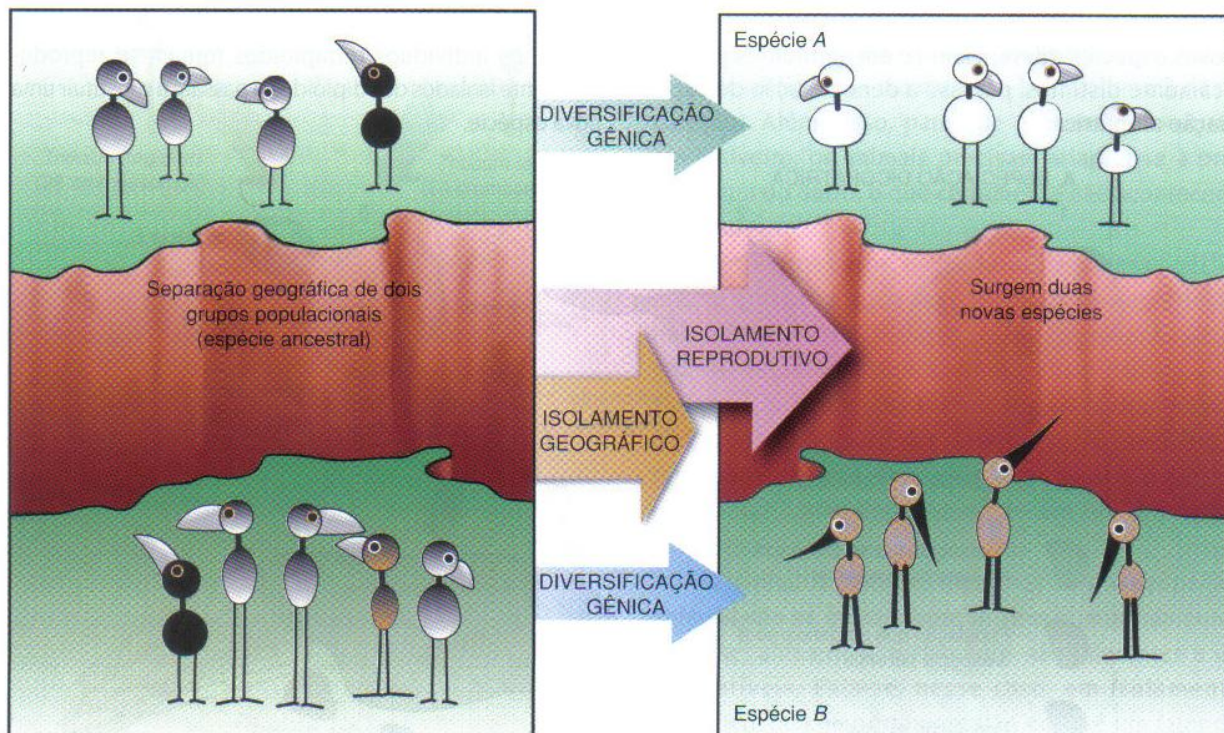
Especiação alopátrica

A **especiação alopátrica** (do grego *allós*, outro, diferente) considera que o primeiro passo para a formação de duas novas espécies é a separação geográfica entre populações de uma espécie ancestral. Uma vez isoladas geograficamente, os cruzamentos entre os membros de duas populações deixam de ocorrer. Assim, mutações que aconteçam em uma delas e sejam adaptativas não serão compartilhadas com a outra. A seleção natural atua diferenciadamente sobre os membros de cada população, conduzindo cada uma delas a uma adaptação particular. À medida que o tempo passa, a tendência é a progressiva diversificação do conjunto gênico de populações isoladas.

Depois de um longo período de isolamento geográfico, as populações isoladas podem ter-se tornado tão diferentes uma da outra, no aspecto genético, que a troca de genes entre elas não é mais possível. Diz-se, então, que elas apresentam **isolamento reprodutivo** e, portanto, já constituem duas espécies diferentes.

Especiação dicopátrica e especiação peripátrica

O modelo clássico de especiação alopátrica, conhecido como **especiação dicopátrica** (do grego *di*, dois, e do latim *patriae*, lugar de nascimento), propõe que duas novas espécies se formam pela separação geográfica dos indivíduos de uma espécie ancestral em duas populações. Essa separação, ou **isolamento geográfico**, pode ocorrer de diversas maneiras: o aparecimento de um rio cortando uma planície, o deslizamento de uma geleira, um derramamento de lava etc. O isolamento geográfico também poderia ocorrer, por exemplo, se uma parcela significativa de uma população migrasse para outra região e deixasse de ter contato com a população original. **(Fig. 11.4)**

Em 1954, Ernst Mayr propôs um novo tipo de especiação alopátrica, que ele chamou de **especiação peripátrica** (do grego *peri*, ao redor, em torno). Esta ocorreria pelo isolamento de populações em áreas marginais de uma população original, daí seu nome. Segundo Mayr, a especiação peripátrica tem sido muito mais importante no processo evolutivo do que a especiação dicopátrica.

▲ **Figura 11.4** • Representação esquemática do modelo de especiação dicopátrica. O isolamento geográfico bloqueia o fluxo gênico entre as populações isoladas e permite a diferenciação gênica. Pressões seletivas diversificadas acentuam as diferenças. O último passo é o desenvolvimento do isolamento reprodutivo, que bloqueia biologicamente a troca de genes.

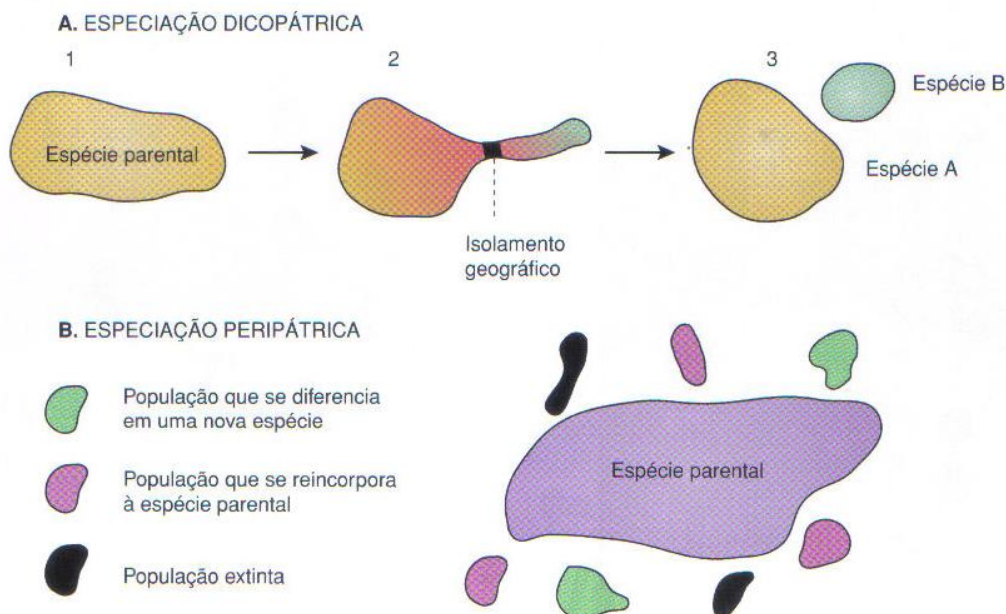
No modelo da especiação peripátrica, grupos de indivíduos que vivem em áreas marginais à área ocupada pela população podem acumular diferenças em relação aos demais indivíduos. Isso porque, nessas áreas limítrofes, as condições ambientais diferem das condições da área central, existindo microambientes aos quais as populações marginais se adaptam. Esses grupos periféricos podem, eventualmente, isolar-se da população original, como se "brotassem" a partir dela. Segundo Mayr, esses grupos que se isolam da população original já apresentam características ligeiramente diferenciadas, graças à adaptação prévia às regiões periféricas da área de distribuição da população central. Nessas condições, um breve período de isolamento pode desencadear mudanças muito rápidas, levando os indivíduos das populações isoladas perifericamente a perder ou reduzir drasticamente a capacidade de se cruzar com os componentes da população original. Surgiriam, assim, novas espécies. **(Fig. 11.5)**

Especiação simpátrica

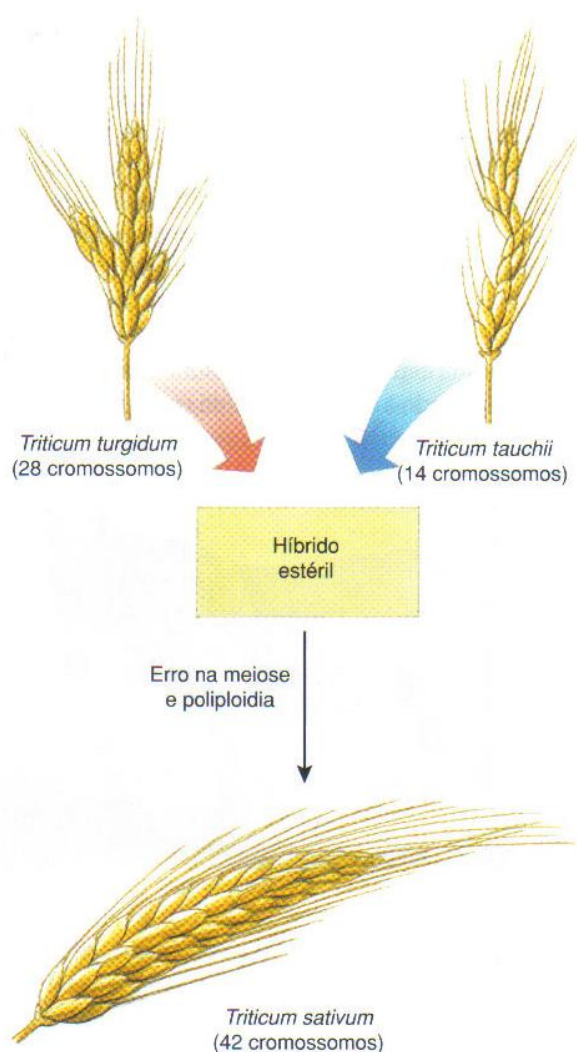
Nos modelos de especiação que vimos anteriormente, pressupõe-se que o isolamento geográfico total (na especiação dicopátrica) ou o isolamento parcial, nas margens da área populacional (na especiação peripátrica), seja o ponto de partida para a diversificação das populações. De uma forma ou de outra, as novas espécies diferenciam-se em ambientes geograficamente distintos, por isso a denominação de especiação alopátrica.

Os cientistas acreditam que, em certos casos, duas espécies podem surgir sem que haja qualquer isolamento geográfico prévio. Nesses casos, o processo é denominado **especiação simpátrica** (do grego *syn*, juntos, e do latim *patriae*, local de nascimento), pois ocorre em uma mesma região geográfica.

Uma das explicações para a especiação simpátrica seria a seleção disruptiva (relembre a seleção disruptiva no capítulo 10). Nesse caso, o favorecimento dos indivíduos com fenótipos extremos para uma característica poderia levar à diferenciação de conjuntos gênicos distintos dentro da mesma população, o que eventualmente levaria ao isolamento reprodutivo de seus portadores. O papel desse tipo de especiação no processo evolutivo ainda é pouco conhecido.

Novas espécies podem surgir, de modo abrupto, em conseqüência de **mutações cromossômicas** ocorridas durante as divisões celulares. Erros na meiose podem formar gametas diplóides, em vez de haplóides. O encontro de gametas diplóides forma zigotos tetraplóides, que se desenvolvem e originam indivíduos com número de cromossomos duplicado em relação à espécie ancestral. Dois indivíduos tetraplóides podem cruzar-se e produzir descendência fértil, ao passo que o cruzamento entre um tetraplóide e um diplóide gera indivíduos triplóides, que são estéreis. A esterilidade dos indivíduos triplóides decorre do fato de seus cromossomos não poderem se emparelhar corretamente na meiose, o que produz gametas inviáveis. Assim, os indivíduos tetraplóides tornam-se reprodutivamente isolados dos diplóides e passam a constituir uma nova espécie.

▲ **Figura 11.5** • Esquemas que comparam a especiação dicopátrica (**A**) e a especiação peripátrica (**B**). As áreas coloridas representam os limites hipotéticos das populações em especiação. (Modificado de Mayr, 2001.)

A especiação por poliploidia é bem mais comum em plantas do que em animais. Há evidências de que diversas espécies de plantas cultivadas surgiram a partir de híbridos entre duas espécies diferentes. Por exemplo, o trigo comum (*Triticum sativum*), que possui 42 cromossomos, surgiu há aproximadamente 8 mil anos por hibridização de uma espécie de trigo de 28 cromossomos (*Triticum turgidum*) com um trigo selvagem de 14 cromossomos (*Triticum tauchii*). Além do trigo, o algodão, a batata e o tabaco, entre outras plantas, são espécies poliplóides originadas, provavelmente, por hibridização entre espécies diferentes. **(Fig. 11.6)**

Além desses possíveis processos de formação de espécies, a deriva gênica, estudada no capítulo 10, também pode levar à formação de novas espécies.

▲ **Figura 11.6** • Representação da origem do trigo comum (*Triticum sativum*) pela poliploidização de um híbrido entre duas espécies de trigo selvagem.

Isolamento reprodutivo

A especiação se completa com o surgimento de **isolamento reprodutivo**, que impede indivíduos de espécies diferentes de trocar genes por cruzamento. Diversos mecanismos podem impedir essa troca de genes, constituindo diferentes tipos de isolamento reprodutivo. Estes podem atuar antes da formação do zigoto, sendo por isso chamados de **processos pré-zigóticos**, ou depois de o zigoto ter-se formado, sendo chamados de **processos pós-zigóticos**.

Processos pré-zigóticos de isolamento reprodutivo

Em certos casos, os membros de duas espécies não se cruzam pelo fato de viverem em hábitats diferentes. Fala-se, nesse caso, em **isolamento de hábitat**. Um exemplo ocorre entre leões e tigres, que podem se cruzar em cativeiro, produzindo descendentes, em alguns casos, férteis. Isso não ocorre na natureza porque essas duas espécies vivem em hábitats totalmente diferentes: os leões vivem nas savanas e os tigres, nas florestas. Esse não é, entretanto, o único tipo de isolamento entre essas espécies; os híbridos entre leões e tigres são, em sua maioria, estéreis (relembre o exemplo da formação de híbridos entre tigres e leões — *ligers* e *tigons* — no capítulo 1 do volume 2 desta coleção). Além disso, para que o cruzamento ocorra em cativeiro, os animais precisam adaptar-se à presença um do outro, o que certamente não aconteceria na natureza.

Em certos casos, os membros de duas espécies não se cruzam porque seus períodos de reprodução não coincidem. Fala-se, então, em **isolamento sazonal**, ou **estacional**. Por exemplo, duas espécies de aves que habitam uma mesma região podem não se cruzar por terem períodos de reprodução em diferentes épocas do ano. O mesmo ocorre entre espécies de plantas, cujas flores amadurecem em diferentes estações.

Em muitos casos, os membros de duas espécies animais não se cruzam porque seus comportamentos de corte, antes do acasalamento, são diferentes e incompatíveis. Fala-se, nesse caso, em **isolamento etológico**, ou **comportamental**. A **corte** é um fator de fundamental importância na reprodução de diversas espécies animais, em que as fêmeas só aceitam o macho depois de ele realizar um complexo ritual de corte, típico de cada espécie. **(Fig. 11.7**, **na página seguinte)**

▲ **Figura 11.7** • Exemplos de isolamento reprodutivo. Leões (**A**) e tigres (**B**) estão isolados por ocupar hábitats muito distintos. **C.** A corte nupcial é importante no isolamento reprodutivo. Na foto, o macho de pavão exibe sua cauda colorida para a fêmea; esta só aceita machos que executem a corte própria da espécie.

Um tipo de isolamento decorre de os membros de duas espécies não se cruzarem por incompatibilidade entre seus órgãos reprodutores. Fala-se, nesse caso, em **isolamento mecânico**. Isso pode ocorrer tanto em animais, em que a diferença de tamanho ou forma dos órgãos genitais impede a cópula, como em plantas, em que o tubo polínico não consegue germinar no estigma de uma flor de outra espécie.

Processos pós-zigóticos de isolamento reprodutivo

Há casos em que os membros de duas espécies copulam e o zigoto se forma, mas o embrião morre prematuramente. Fala-se, então, em **inviabilidade do híbrido**.

Às vezes forma-se um híbrido entre duas espécies, até mais vigoroso (*vigor híbrido ou heterose*) que os membros das espécies parentais, porém estéril. Fala-se, então, em **esterilidade do híbrido**. A esterilidade geralmente ocorre porque as gônadas se desenvolvem anormalmente ou porque a meiose é anormal. **(Fig. 11.8)**

Em certos casos, a primeira geração de híbridos entre duas espécies (F_1) é normal e fértil, mas seus filhos — a geração F_2 — são indivíduos debilitados ou estéreis. Fala-se, assim, em **deterioração de F_2**. Isso se deve à recombinação gênica incompatível durante a formação dos gametas que originam a geração F_2.

Geralmente há diversos mecanismos de isolamento atuando ao mesmo tempo; quanto mais tempo se passa desde a diversificação por cladogênese que originou duas espécies, maiores serão as diferenças acumuladas entre elas e, conseqüentemente, mais eficientes os mecanismos de isolamento. O isolamento reprodutivo mantém cada espécie em sua trajetória evolutiva particular, permitindo a diferenciação do conjunto gênico típico de cada espécie.

▲ **Figura 11.8** • Um exemplo de isolamento reprodutivo por esterilidade do híbrido ocorre no cruzamento entre uma égua (*Equus caballus*) (**A**) e um jumento (*Equus asinus*) (**B**), em que é gerada a mula (**C**), ou o burro, um híbrido estéril. Se o cruzamento for entre um cavalo e uma jumenta, nasce um animal conhecido como bardoto, que apresenta mais semelhança com a jumenta do que com o cavalo.

11.3 Origem dos grandes grupos de seres vivos

O conhecimento científico permite à nossa imaginação "viajar" ao passado da Terra, reconstituindo cenários detalhados da vida há milhares, milhões ou mesmo bilhões de anos. Por exemplo, se voltássemos ao Brasil de 500 mil anos atrás, poderíamos encontrar tatus com quase 2 metros de comprimento convivendo com mastodontes, animais semelhantes a elefantes, porém maiores; talvez conseguíssemos observar tigres com "dentes de sabre" atacando preguiças gigantes que, nessa época, caminhavam no solo. Se viajássemos à África de dois milhões de anos atrás, talvez pudéssemos encontrar os ancestrais da espécie humana disputando carniça com os ancestrais das hienas e dos abutres.

Como é possível saber tanto sobre o passado da Terra se ainda não havia seres humanos para testemunhar a história e contá-la aos descendentes? O conhecimento sobre a vida passada resulta de um paciente trabalho de cientistas, que, como detetives, analisam e interpretam vestígios e pistas fósseis, deixadas por seres que viveram em épocas antigas. Químicos e bioquímicos também têm se empenhado no estudo da vida passada, tentando responder a uma das mais fascinantes questões da humanidade: como surgiu e evoluiu a vida na Terra?

Conhecer nossas origens é importante porque permite compreender nossas conexões com outras formas de vida. Em seguida, traçamos um resumo da história da vida na Terra, desde sua origem até hoje, aplicando conhecimentos sobre evolução tratados anteriormente.

Divisão do tempo geológico

As rochas mais antigas da Terra localizam-se na região oeste da Groenlândia (perto do Pólo Norte), tendo idade estimada em 3,9 bilhões de anos. A idade da Terra é estimada em torno de 4,6 bilhões de anos. O período que vai da origem da Terra até hoje é conhecido como **tempo geológico**.

O tempo geológico costuma ser dividido em quatro grandes intervalos de tempo, as **eras geológicas**, cada uma caracterizada por ocorrências marcantes. Essas eras são, em seqüência: **Pré-cambriana**, **Paleozóica**, **Mesozóica** e **Cenozóica**. As eras são subdivididas em unidades menores, os **períodos geológicos**. Até recentemente, a era Pré-cambriana era a única não subdividida em períodos; em maio de 2004, porém, a Comissão Internacional de Estratigrafia passou a incorporar um novo período à era Pré-cambriana, denominado período Ediacarano, caracterizado pela grande diversificação de animais invertebrados. Na era Cenozóica, os períodos são ainda subdivididos em unidades menores, as **épocas geológicas**. **(Tab. 11.1)**

A era Pré-cambriana abrange desde a formação da Terra, há 4,6 bilhões de anos, até 570 milhões de anos atrás, quando teve início a era Paleozóica. Portanto, a era Pré-cambriana durou cerca de quatro bilhões de anos, o que representa 87% do tempo de existência da Terra. A era Paleozóica durou cerca de 325 milhões de anos e a era Mesozóica, cerca de 179 milhões de anos. A era Cenozóica, na qual nos encontramos, teve início há apenas 65 milhões de anos. A razão dessas diferenças é que a divisão do tempo geológico baseia-se em eventos biológicos e geológicos marcantes, que ficaram registrados nas rochas nos diversos períodos. Que eventos foram esses e como podemos saber quando eles ocorreram?

Critérios para dividir o tempo geológico

O limite entre as eras Pré-cambriana e Paleozóica é marcado por um aumento significativo no número de fósseis, a partir de 570 milhões de anos atrás. As rochas pré-cambrianas contêm pouco fósseis, enquanto as rochas paleozóicas são relativamente ricas em vestígios de organismos que viveram na época de sua formação. A análise das rochas formadas no limite entre as duas primeiras eras revela profundas mudanças climáticas, com o término de um período de 200 milhões de anos de frio intenso, em que o planeta permaneceu totalmente coberto de gelo, e o início de um período com temperaturas mais amenas. Os cientistas acreditam que o aumento de temperatura tornou o ambiente mais favorável à vida, o que permitiu o surgimento de diversas espécies novas, fenômeno que ficou conhecido por "**explosão cambriana**". O registro fóssil sugere que os ancestrais da maioria dos filos animais atuais surgiram em menos de 10 milhões de anos, durante a fase de transição entre a era Pré-cambriana e a era Paleozóica. **(Fig. 11.9**, na página 251**)**

O fim da era Paleozóica e início da era Mesozóica é marcado pela extinção de grande quantidade de espécies de seres vivos. Muitos fósseis presentes em rochas do fim do paleozóico não são mais encontrados nas rochas formadas em seguida, no início do mesozóico. Acredita-se que ocorreu uma grande catástrofe há cerca de 250 milhões de anos, que levou ao desaparecimento de cerca de 90% das espécies de seres vivos. Foi nessa época que emergiu dos mares um grande continente, a Pangea, que mais tarde viria a se fragmentar e originar os continentes atuais. O capítulo 2 do volume 1 desta coleção traz mais informações sobre a origem dos continentes.

TABELA 11.1 • Eventos biológicos durante o tempo geológico

Era	Período	Época	Milhões de anos atrás	Eventos biológicos importantes
Cenozóica	Quaternário	Recente	0-0,01	Dispersão do *Homo sapiens* moderno pelo planeta e aparecimento da civilização humana; declínio das grandes florestas e considerável extinção de espécies.
		Pleistoceno	0,01-2	Aparecimento da espécie humana moderna; extinção de mamíferos de grande porte.
	Terciário	Plioceno	2-6	Aparecimento dos hominídeos; expansão dos mamíferos de grande porte.
		Mioceno	6-24	Expansão dos campos e diminuição das florestas.
		Oligoceno	24-37	Aparecimento dos macacos antropóides e de muitas famílias de plantas modernas.
		Eoceno	37-58	Aparecimento das ordens modernas de mamíferos e expansão das aves.
		Paleoceno	58-66	Diversificação dos mamíferos e das plantas angiospermas; aparecimento dos primeiros primatas (prossímios).
Mesozóica	Cretáceo		66-144	Extinção dos dinossauros e de diversas espécies de animais e plantas; aparecimento dos mamíferos placentários e das plantas angiospermas.
	Jurássico		144-208	Apogeu dos dinossauros; abundância de plantas gimnospermas; aparecimento dos ancestrais das aves.
	Triássico		208-245	Aparecimento dos dinossauros, dos mamíferos e de plantas gimnospermas dos grupos das cicas e dos gincos.
Paleozóica	Permiano		245-286	Diversificação dos répteis e declínio dos anfíbios; aparecimento das plantas gimnospermas (coníferas) e da maioria das ordens modernas de insetos.
	Carbonífero		286-360	Diversificação dos anfíbios; aparecimento dos répteis; expansão de insetos e de florestas de plantas semelhantes a pteridófitas, que deram origem aos depósitos de carvão mineral.
	Devoniano		360-408	Aparecimento das primeiras plantas com sementes, dos anfíbios e dos insetos. Abundância de moluscos e de trilobites e considerável diversidade de peixes dotados de mandíbula.
	Siluriano		408-438	Aparecimento das primeiras plantas vasculares em ambiente de terra firme e dos primeiros peixes dotados de mandíbula.
	Ordoviciano		438-505	Continuidade da diversificação das algas e grande expansão dos invertebrados e dos peixes sem mandíbulas.
	Cambriano		505-570	Diversificação das algas e dos invertebrados, com aparecimento dos primeiros animais dotados de esqueleto.
Pré-Cambriana (de 570 milhões a 4,6 bilhões de anos atrás)	Ediacarano		570-600	Diferenciação dos seres multicelulares.
			700 2.000 2.500 3.500 4.000	Origem provável de: • os primeiros seres vivos multicelulares. • as primeiras células eucarióticas. • a fotossíntese. • as primeiras células (procarióticas). • a vida na Terra.

▲ **Figura 11.9** • Reconstituição artística da vida no mar durante a explosão do cambriano. Os animais representados foram preservados como fósseis em Burgess Shale, um dos mais preciosos e importantes sítios paleontológicos do início da era Paleozóica, localizado nas Montanhas Rochosas canadenses, no interior do Parque Nacional de Yoho, próximo à fronteira oriental da Colúmbia Britânica.

O limite entre as eras Mesozóica e Cenozóica também é marcado pela extinção de mais de metade das espécies de animais e de plantas, tanto marinhas como de terra firme. As mais conhecidas espécies extintas nessa transição foram as de dinossauro. Há indícios de que, na transição entre as eras Mesozóica e Cenozóica, a Terra novamente esfriou. Essa não seria, porém, a verdadeira causa das extinções, e sim a colisão de um grande asteróide com a Terra, que teria ocorrido há cerca de 65 milhões de anos. Existem evidências que apóiam essa explicação, entre elas a presença de uma cratera com 320 km de diâmetro encontrada na península de Yucatán, no México, que teria sido produzida pelo impacto do asteróide. O choque teria levantado uma imensa quantidade de poeira, que permaneceu em suspensão na atmosfera durante meses ou anos, impedindo que a luz do Sol atingisse a superfície, com conseqüente resfriamento do planeta e morte de muitas plantas. Devido à mudança climática e à falta de alimento para os herbívoros, teria ocorrido a extinção de grande quantidade de espécies.

Os nomes de alguns períodos geológicos derivam da denominação das rochas que se formaram na época. Os geólogos do século XIX batizavam as camadas rochosas de acordo com diversos critérios; alguns utilizavam o nome da localidade em que a rocha foi descoberta; outros, o nome dos povos que viviam no local; outros, ainda, as características da rocha; e assim por diante. Por exemplo, o termo **cambriano**, nome do período mais antigo da era Paleozóica, foi proposto em 1835 pelo geólogo inglês Adam Sedgwick (1785-1873) para designar um conjunto de rochas em Gales, na Grã-Bretanha. "Cambria" era o antigo nome latinizado do país de Gales.

Ordoviciano, nome do período da era Paleozóica que sucede o período Cambriano, foi proposto em 1879 pelo geólogo inglês Charles Lapworth (1842-1920) para designar rochas expostas nas montanhas Arening, no norte de Gales. Historicamente, essa área era parte do território habitado por um antigo povo britânico conhecido como ordovices. O termo **devoniano**, nome de outro período da era Paleozóica, foi empregado pela primeira vez em 1839 pelos geólogos ingleses Adam Sedgwick e Sir Roderick Impey Murchison (1792-1871) para designar rochas estudadas em Devon, no sudeste da Inglaterra. **Carbonífero**, nome de outro período da era Paleozóica, foi proposto pelos geólogos ingleses William Daniel Conybeare (1787-1871) e John Phillips (1800-1874), em 1822, para designar rochas encontradas na Inglaterra e em Gales, que continham grandes depósitos de carvão mineral e, portanto, muito carbono.

A partir de sugestões de Adam Sedgwick, em 1838, e de John Phillips, em 1841, os períodos foram agrupados em três eras, denominadas **Paleozóica** ("vida antiga"), **Mesozóica** ("vida intermediária") e **Cenozóica** ("vida moderna").

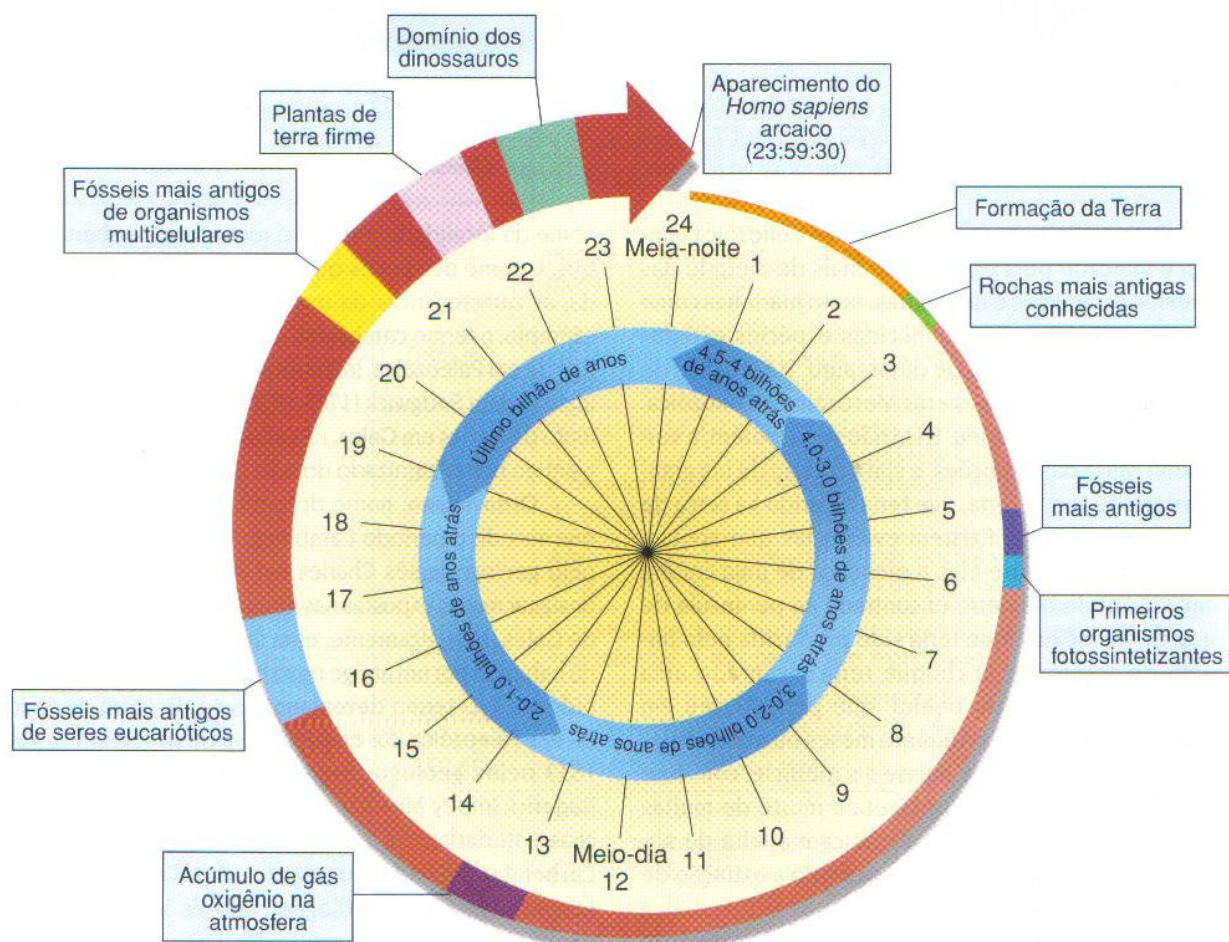
As rochas mais antigas, anteriores às da era Paleozóica, caracterizadas pela presença de poucos fósseis, foram consideradas pertencentes a uma primeira era, denominada **Pré-cambriana**, termo que significa "anterior ao cambriano", o primeiro período da era Paleozóica.

O novo período geológico, criado em 2004, recebeu a denominação de Ediacarano pelo fato de os fósseis mais antigos de metazoários, característicos desse período, terem sido encontrados, originalmente, em uma região da Austrália chamada de Ediacara.

A vida nas diferentes eras geológicas

A história da vida está intimamente ligada à história geológica da Terra. Ao longo da existência de nosso planeta, diversos eventos geológicos alteraram os ambientes terrestres, definindo os rumos da evolução biológica. Por exemplo, a elevação do istmo do Panamá foi responsável pela extinção de inúmeras espécies de mamíferos sul-americanos, eliminadas pela competição com outros mamíferos vindos da América do Norte.

A atividade dos seres vivos, por outro lado, causou profundas alterações nas condições físicas e químicas do planeta. O aparecimento dos seres fotossintetizantes, por exemplo, que expelem gás oxigênio como produto da fotossíntese, alterou profundamente a composição da atmosfera terrestre. Com a presença desse gás, a atmosfera tornou-se fortemente oxidante; o gás oxigênio passou a reagir quimicamente com metais da crosta terrestre, alterando-a. Além disso, o gás oxigênio provavelmente causou a morte da maioria das formas de vida então existentes, afetando o curso da evolução biológica.

Assim, a história da Terra e a história da vida são inseparáveis, e foi a interação entre elas que levou às condições e às formas de vida existentes na atualidade. **(Fig. 11.10)**

▲ **Figura 11.10** • Se a história da Terra fosse comprimida em uma escala de 24 horas, nossa espécie teria surgido apenas no último minuto, o que nos dá idéia de como isso ocorreu recentemente, na escala de tempo geológico.

Vida na era Pré-cambriana

A era Pré-cambriana é a mais longa na divisão da escala de tempo geológico; ela abrange cerca de 87% da existência da Terra, estendendo-se desde a formação de nosso planeta até 570 milhões de anos atrás. No início da era Pré-cambriana surgiram as moléculas precursoras da vida, cuja principal característica era a capacidade de autoduplicação. Essas moléculas devem ter-se organizado em sistemas cada vez mais complexos, capazes de realizar certos tipos de reações químicas que permitiam obter energia e utilizá-la para manter a organização molecular, para crescer e para se multiplicar. O aparecimento de "sistemas autoduplicativos", que provavelmente se mantinham isolados do ambiente por um envoltório membranoso, marca o início da história da vida na Terra. Esses "sistemas autoduplicativos", que surgiram, ao que tudo indica, há mais de 3,5 bilhões de anos, foram os ancestrais das células vivas (relembre as teorias modernas sobre origem da vida no capítulo 2 do volume 1 desta série).

Os primeiros seres vivos deviam ser muito simples, constituídos por uma única célula com organização procariótica, ou seja, desprovida de envoltório nuclear e de organelas membranosas no citoplasma. Os cientistas imaginam que os seres atuais mais semelhantes aos primeiros seres vivos que habitaram nosso planeta sejam as arqueas (antigamente chamadas de arqueobactérias), capazes de viver em ambientes inóspitos como fontes de águas quentes, lagos salgados e pântanos. Acredita-se que esses ambientes tenham certa semelhança com os que existiram na Terra primitiva, nos quais as primeiras formas de vida evoluíram.

Por volta de 2 bilhões de anos atrás, surgiu a célula eucariótica, provavelmente como resultado da associação simbiótica entre células procarióticas. As evidências de que as mitocôndrias presentes em praticamente todas as células eucarióticas e os plastos presentes em células de algas e de plantas descendam de bactérias endossimbióticas são atualmente irrefutáveis.

Outro passo importante na história da vida foi o aparecimento dos seres eucarióticos **multicelulares**, isto é, constituídos por muitas células. Nessa estratégia, células resultantes da multiplicação de uma célula inicial — o zigoto — passaram a viver juntas e a dividir as tarefas de sobrevivência. Com o tempo, surgiram organismos com células cada vez mais especializadas no desempenho de funções específicas, o que permitiu o aparecimento dos tecidos e dos órgãos dos organismos multicelulares.

Fósseis de seres multicelulares, pertencentes a algas filamentosas e a animais invertebrados de corpo mole, semelhantes a águas-vivas e a certos vermes marinhos atuais, aparecem pela primeira vez em rochas com cerca de 670 milhões de anos.

Vida na era Paleozóica

As rochas sedimentares formadas há cerca de 570 milhões de anos, no início da era Paleozóica, contêm muito mais fósseis que as rochas pré-cambrianas. Isso é explicado pelo aparecimento de seres dotados de esqueletos resistentes, cujos fósseis têm mais chance de se preservar que de animais de corpo mole.

O documentário fóssil do período Cambriano (570 a 505 milhões de anos atrás) revela que, nessa época, os mares já eram habitados por grande variedade de algas multicelulares e de animais invertebrados, entre eles cordados primitivos, que viriam a originar os vertebrados. Alguns animais cambrianos tinham semelhanças com animais de hoje, e poderíamos associá-los claramente aos filos atuais. Outros, porém, tinham poucas semelhanças com as espécies modernas, tendo se extinguido sem deixar descendentes atuais.

Um dos fósseis mais comuns nas rochas de toda a era Paleozóica é o trilobite, animal artrópode que lembra um crustáceo. Os trilobites foram provavelmente os animais mais abundantes nos mares, entre 570 e 245 milhões de anos atrás, atingindo sua densidade máxima por volta de 505 milhões de anos e extinguindo-se totalmente ao final da era Paleozóica. **(Fig. 11.11)**

▲ **Figura 11.11** • Fotografia de fóssil de um trilobite. Esses invertebrados dominaram os mares durante toda a era Paleozóica e extinguiram-se completamente ao final dela.

A conquista da terra firme

Até cerca de 438 milhões de anos atrás, quando teve início o período Siluriano, a vida estava restrita aos mares. Nesse período, provavelmente a partir de um grupo de algas verdes, começaram a surgir as primeiras plantas dotadas de adaptações que lhes permitiam viver fora d'água. A quantidade de fósseis de plantas aumenta nas camadas de rocha seguintes, revelando que os continentes tornaram-se habitados por espécies vegetais de pequeno porte.

A presença de plantas em terra firme criou condições para que animais também pudessem sair da água para o ambiente seco, pois agora tinham onde se abrigar e o que comer. Os fósseis revelam que os primeiros animais a conquistar o ambiente de terra firme foram os insetos e os aracnídeos. Em seguida, uma linhagem de peixes primitivos também conseguiu adaptar-se ao ambiente de terra firme, originando os anfíbios.

Origem dos animais de quatro pernas (tetrápodes)

Os mais antigos fósseis de vertebrados são fragmentos de escamas de um peixe primitivo que viveu na metade do período Ordoviciano, há cerca de 480 milhões de anos. Esses peixes não tinham mandíbulas e foram os ancestrais diretos dos peixes agnatos atuais como a lampreia. Um grupo de agnatos primitivos deu origem a peixes dotados de mandíbula, que, por serem altamente eficientes na captura de alimento, diversificaram-se e expandiram-se rapidamente, passando a dominar os mares.

Os mares do período Devoniano, entre 408 a 360 milhões de anos atrás, foram dominados pelos peixes dotados de mandíbula. Havia fundamentalmente dois grupos desses peixes: um que apresentava nadadeiras reforçadas por raios cartilaginosos (nadadeiras radiais), e outro que apresentava nadadeiras carnosas e dotadas de estrutura óssea de sustentação (nadadeiras lobadas). Os peixes com nadadeiras radiais tiveram grande sucesso evolutivo, e a maioria dos peixes atuais (actinopterígios) descende deles. Os peixes com nadadeiras lobadas, os **crossopterígios**, cujos representantes atuais são os celacantos, teriam originado os animais de quatro pernas, os **tetrápodes** (do grego *tetra*, quatro, e *podos*, pata, perna), grupo ao qual pertencem os anfíbios, os répteis, as aves e os mamíferos atuais.

Os peixes crossopterígios apresentavam, na base de suas nadadeiras peitorais e pélvicas, uma parte carnosa suportada por um esqueleto ósseo interno. Acredita-se que esses peixes podiam apoiar-se no solo com as nadadeiras e "caminhar" pelo fundo de rios e lagos. Esse modo peculiar de movimentação teria permitido aos crossopterígios realizar incursões à terra firme, à procura de alimento e de aquecimento solar, com conseqüente aumento de atividade metabólica. Gradativamente, eles foram se adaptando às condições do meio aéreo e suas nadadeiras evoluíram, transformando-se em pernas. Essa foi a provável origem dos anfíbios, que surgiram entre 408 e 360 milhões de anos atrás. **(Fig. 11.12)**

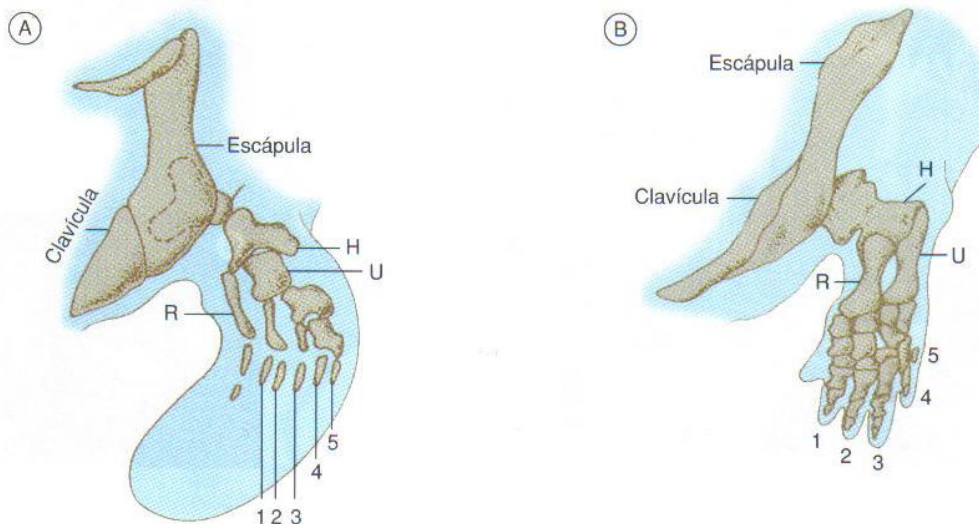
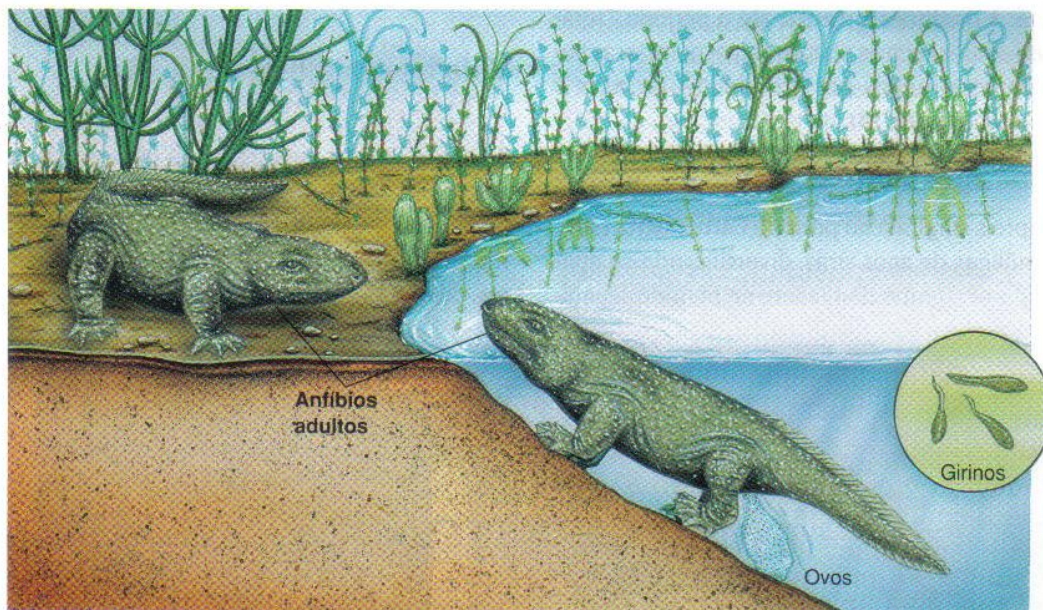
Breve história dos anfíbios

Os anfíbios foram os primeiros vertebrados a habitar a terra firme, mas não a conquistaram totalmente, pois sua reprodução continuou a ser realizada em meio aquático. Ainda hoje, os óvulos e os espermatozóides da maioria dos anfíbios são eliminados na água e a fecundação ocorre fora do corpo da fêmea. O zigoto da maioria das espécies desenvolve-se em uma forma larval tipicamente aquática, o girino, que possui respiração branquial. É somente após a metamorfose que a maioria dos anfíbios desenvolve pulmões.

◄ **Figura 11.12** • Representação do celacanto *Latimeria chalumnae*, peixe atual com nadadeiras lobadas pertencente à classe Actinistia do filo Chordata. Esse animal é considerado um rélico, isto é, "fóssil vivo" por sua grande semelhança com peixes desse grupo que viveram há quase 400 milhões de anos.

Os anfíbios expandiram-se durante o período Carbonífero, entre 360 e 286 milhões de anos atrás, tendo sido o grupo de animais de grande porte dominante em terra firme por cerca de 75 milhões de anos. Eles declinaram no período Permiano, entre 286 e 245 milhões de anos atrás, simultaneamente à expansão dos répteis, com os quais devem ter competido em desvantagem. **(Fig. 11.13)**

Expansão da vegetação

Entre 438 e 408 milhões de anos, no período Siluriano, surgiram as primeiras plantas vasculares, ou seja, dotadas de vasos condutores de seiva. Graças a essa inovação evolutiva, as plantas puderam atingir grandes tamanhos e formaram as primeiras matas nas margens de regiões alagadas. As primeiras plantas vasculares reproduziam-se de modo semelhante ao das pteridófitas atuais, com gametófitos que dependiam de ambientes úmidos para se desenvolver. No decorrer do período Devoniano, entre 408 e 360 milhões de anos atrás, surgiram espécies cujos gametófitos se desenvolviam sobre o corpo da planta-mãe, formando um tipo primitivo de semente. O aparecimento dessa inovação evolutiva foi um grande passo para a conquista definitiva do ambiente de terra firme pelas plantas. Tornando-se independentes da água líquida para a reprodução, as plantas puderam expandir-se para locais distantes das regiões alagadas. Relembre a reprodução das plantas, no capítulo 6 do volume 2 desta série.

▲ **Figura 11.13** • Acima, reconstrução de um cenário da era Paleozóica, mostrando anfíbios de grande porte. Abaixo, comparação entre as estruturas ósseas da nadadeira de um peixe crossopterígio (**A**) e da perna de anfíbio primitivo (**B**); note a homologia entre os diversos ossos. Úmero (H), rádio (R), ulna (U).

Durante o período Carbonífero, entre 360 e 286 milhões de anos atrás, grandes florestas passaram a cobrir os continentes, criando ambientes úmidos e protegidos, favoráveis à vida de insetos e de anfíbios. Esses animais diversificaram-se em inúmeras espécies, com diferentes tamanhos e formas corporais. Nas florestas do Carbonífero, viviam desde anfíbios com cerca de 6 m de comprimento, lembrando salamandras gigantes, até espécies pequenas e desprovidas de pernas. A vegetação era composta por pteridófitas com aspecto semelhante a samambaias, licopódios e cavalinhas atuais, porém maiores, atingindo alguns metros de altura.

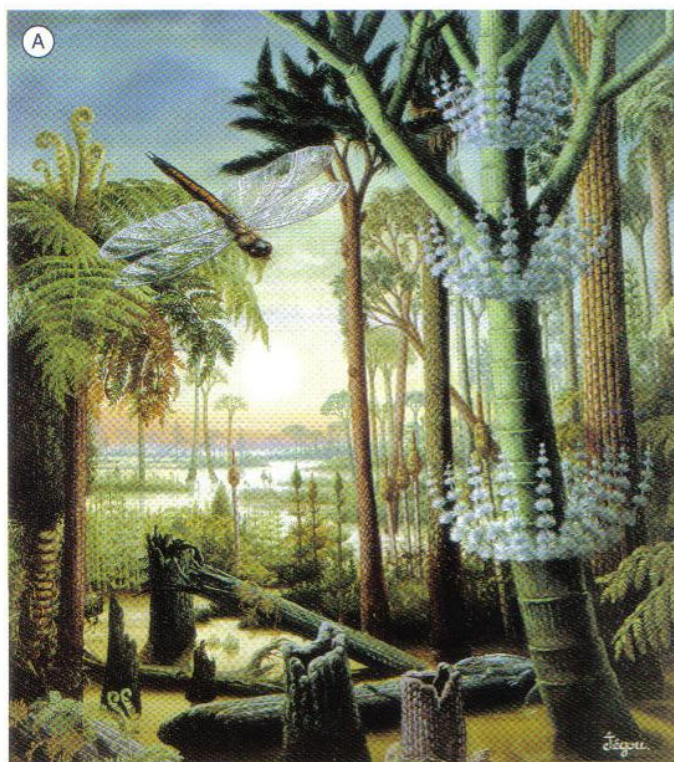
No período Permiano, entre 286 e 245 milhões de anos atrás, surgiram as primeiras plantas gimnospermas, que se caracterizavam por possuir uma forma primitiva de semente. A partir dessa época, até o período Cretáceo, quando apareceram as plantas angiospermas, as florestas foram constituídas por pteridófitas gigantes e gimnospermas. **(Fig. 11.14)**

Os primeiros répteis

Os répteis surgiram no período Carbonífero, entre 360 e 286 milhões de anos atrás, diversificando-se muito e tornando-se o grupo dominante no período seguinte, o Permiano. Uma aquisição evolutiva importante, que contribuiu definitivamente para o grande sucesso dos répteis, foi o aparecimento de ovos dotados de casca impermeável e que podiam armazenar grande quantidade de nutrientes. Com isso, os répteis deixaram de depender de ambientes aquáticos para se reproduzir e espalharam-se nos ambientes até então dominados por anfíbios de grande porte, competindo com eles e, provavelmente, causando sua extinção.

O fim da era Paleozóica e início da era Mesozóica, há cerca de 245 milhões de anos, foi marcado por uma brusca mudança climática no planeta, que se tornou frio e seco. Geleiras passaram a cobrir a maior parte dos continentes e a maioria das espécies existentes se extinguiu.

Vida na era Mesozóica

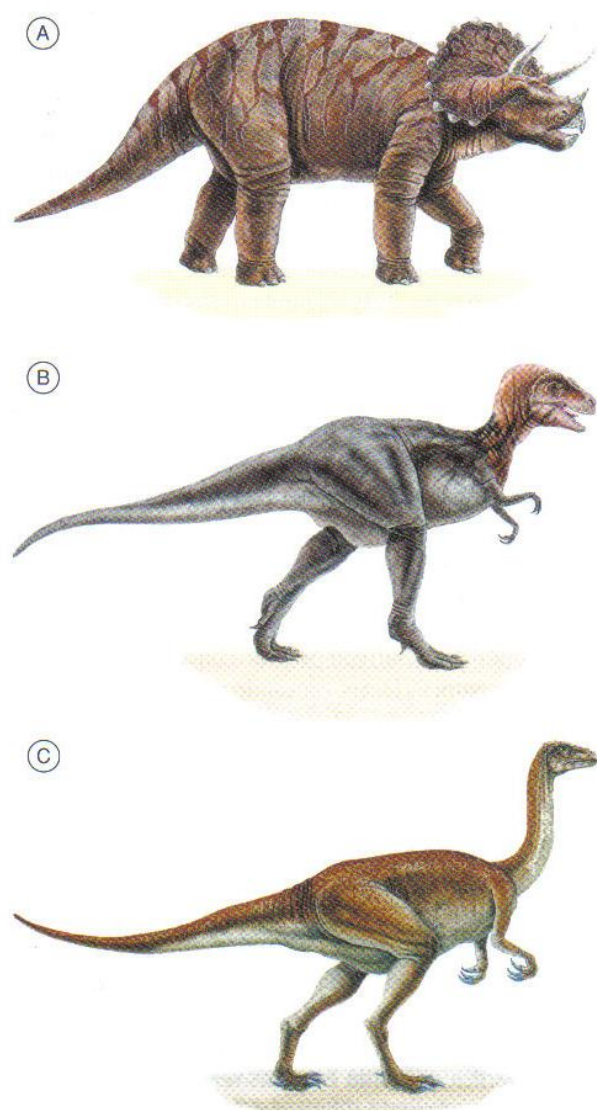
Os répteis que sobreviveram à extinção voltaram a se diversificar durante a era Mesozóica, ocupando ambientes aquáticos e de terra firme, até mesmo com o aparecimento de espécies voadoras. Um dos grupos de répteis que surgiu nessa época deu origem aos mamíferos, como veremos mais adiante.

▲ **Figura 11.14** • **A.** Representação artística de uma floresta do período Carbonífero, feita com base nas evidências fósseis. **B.** Foto de uma das 121 espécies de Cycadophita (cica) atuais. **C.** Foto de folhas da única espécie de Ginkgophyta (gincobiloba) vivente. Essas plantas são rélicos, isto é, "fósseis vivos", tendo predominado nas florestas da era Mesozóica, com algumas espécies persistindo até os dias de hoje com poucas mudanças.

Expansão e extinção dos dinossauros

A partir do período Jurássico, entre 208 e 144 milhões de anos atrás, um grupo de répteis conhecidos como dinossauros diversificou-se muito, passando a ser o grupo dominante nos ambientes de terra firme. Havia desde dinossauros pequenos, de tamanho comparável ao de uma galinha, até formas gigantescas, com mais de 10 m de altura e dezenas de toneladas de massa. A maioria dos dinossauros era herbívora, mas também havia diversas espécies carnívoras, que se alimentavam de insetos, de anfíbios e de outros dinossauros. Alguns cientistas admitem que pelo menos alguns dinossauros tinham "sangue quente", isto é, eram endotérmicos, como ocorre com as aves e mamíferos atuais. **(Fig. 11.15)**

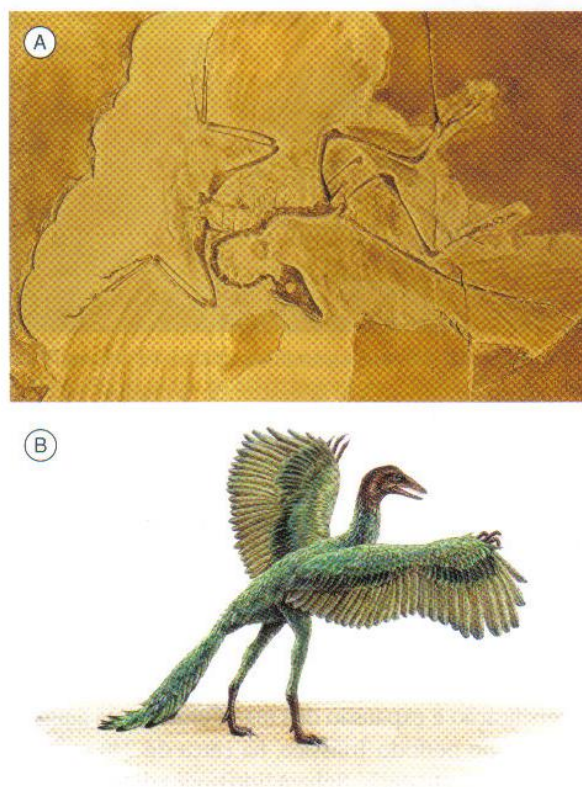
Ⓐ

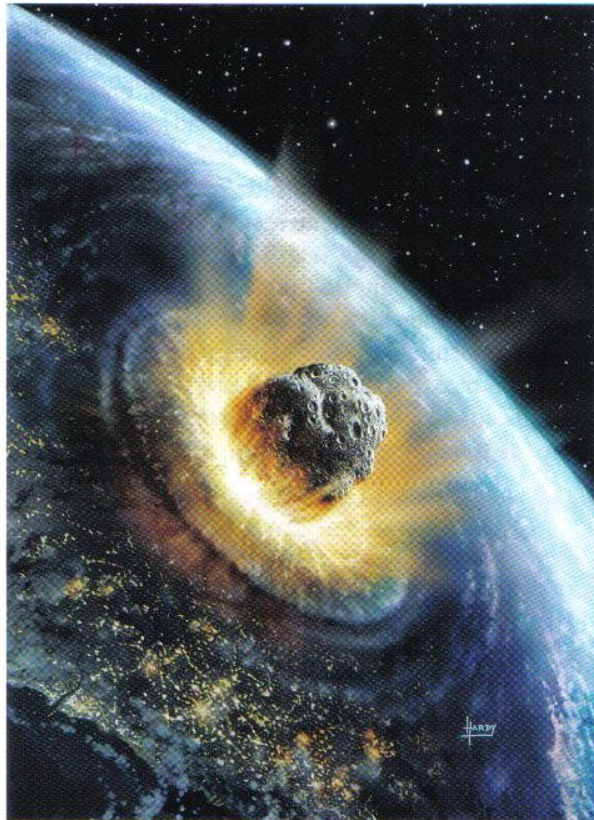
Ⓑ

Ⓒ

▲ **Figura 11.15** • Representação artística, com base no documentário fóssil, de algumas espécies de dinossauros. **A.** *Triceratops*. **B.** *Tyranossaurus*. **C.** *Segnossaurus*.

Acredita-se que as aves tenham surgido no período Jurássico, entre 208 e 144 milhões de anos atrás, a partir de um grupo primitivo de répteis. Alguns zoólogos consideram que aves e répteis atuais, apesar das aparentes diferenças, são essencialmente semelhantes e deveriam ser incluídos na mesma classe. As novas descobertas paleontológicas revelaram que muitos répteis primitivos tinham o corpo coberto de penas, como o famoso *Archaeopterix*, que viveu no final do período Jurássico, há cerca de 150 milhões de anos. Apesar do sucesso causado pela descoberta do *Archaeopterix* no século XIX, quando o primeiro fóssil desse animal foi encontrado, acredita-se que eles provavelmente não foram os ancestrais das aves atuais. Em 1986 foram descobertos fósseis de um animal extinto classificado como *Protoavis*, que parece ser mais diretamente relacionado às aves atuais do que o *Archaeopteryx*. **(Fig. 11.16)**

No final do período Cretáceo, há pouco mais de 65 milhões de anos, as aves já apresentavam muitas de suas características atuais, mas ainda conservavam dentes no bico. Atualmente, a classe das aves é muito diversificada, explorando com sucesso os ambientes aéreo, de terra firme e aquático.

Ⓑ

▲ **Figura 11.16** • Impressão e restos fossilizados do *Archaeopteryx* (**A**); Reconstrução hipotética do aspecto geral de seu corpo (**B**). O *Archaeopteryx* tinha o corpo recoberto de penas, diferindo das aves típicas por não apresentar ossos pneumáticos (cheios de ar), ter asas e pelve tipicamente reptilianas e apresentar dentes e uma longa cauda.

Há 65 milhões de anos, no final da era Mesozóica, ocorreu extinção em massa de diversas espécies de plantas e de animais, entre elas a maioria dos dinossauros. Acredita-se que essas extinções tenham sido causadas por uma mudança climática desencadeada pela queda de um cometa ou asteróide na superfície da Terra. Relembre esse assunto na Leitura *O dia em que a Terra incendiou-se*, no capítulo 2 do volume 1 desta série. **(Fig. 11.17)**

▲ **Figura 11.17** • Representação artística da colisão de um grande asteróide com a Terra, que teria ocorrido na região de Chicxalub, na península de Yucatán, no México, há cerca de 65 milhões de anos. Acredita-se que o impacto pode ter sido a causa da extinção dos dinossauros.

Vida na era Cenozóica

O início da era Cenozóica, há 65 milhões de anos, foi marcado por dois eventos principais: a grande expansão e diversificação das plantas angiospermas (plantas com flores), que haviam surgido no período Cretáceo, e a diversificação e expansão dos mamíferos. Esses animais surgiram no período Triássico, há cerca de 230 milhões de anos, mas até então tinham tido pouca diversificação, provavelmente devido à supremacia dos grandes répteis.

Expansão dos mamíferos

Com o desaparecimento dos dinossauros, os primitivos mamíferos, então pouco maiores que um rato e com hábitos noturnos, diversificaram-se e expandiram-se. Segundo os cientistas, praticamente todos os mamíferos atuais surgiram a partir de três grupos de mamíferos primitivos que sobreviveram à catástrofe do final do mesozóico. Um desses grupos foi o ancestral dos monotremados (mamíferos ovíparos), outro dos mamíferos marsupiais, e o terceiro, dos mamíferos placentários. Esses dois grupos de mamíferos apresentam uma diferença no modo de desenvolvimento dos embriões. O desenvolvimento embrionário dos marsupiais tem início no sistema reprodutor feminino, mas logo os embriões deixam o interior do corpo da mãe, indo abrigar-se em uma bolsa revestida de pele, o marsúpio, onde terminam de se desenvolver. O desenvolvimento embrionário dos mamíferos placentários ocorre inteiramente no interior do útero materno, com o embrião sendo alimentado através da placenta.

Na Austrália, os marsupiais tiveram grande diversificação, originando diversas espécies, adaptadas aos mais diferentes hábitats. Na América do Sul, os mamíferos placentários foram os que mais se diversificaram e se expandiram, embora também tenha ocorrido certa diversificação de marsupiais. Na Europa e na América do Norte, não houve aparecimento de marsupiais; os mamíferos que evoluíram com grande sucesso nessas regiões foram os placentários, que se adaptaram aos mais diversos hábitats. Alguns grupos de placentários chegaram a retornar ao ambiente aquático, onde originaram os ancestrais de baleias, golfinhos, focas etc., ao passo que outros, como roedores, carnívoros, ungulados e primatas, tornaram-se predominantes em terra firme.

No final do período Terciário, há 2 milhões de anos, a América do Norte e a América do Sul tornaram-se ligadas novamente pelo istmo do Panamá, depois de terem permanecido isoladas por cerca de 40 milhões de anos. Graças a essa ligação, diversas espécies de mamíferos migraram entre os dois continentes. Placentários invadiram a América do Sul, competindo com os placentários e com os marsupiais locais, causando a extinção da maioria das espécies. Apenas algumas espécies de marsupial sobreviventes, entre elas o gambá, conseguiram estabelecer-se com sucesso no continente norte-americano.

Durante o período Quaternário, iniciado há 2 milhões de anos, evoluíram as espécies modernas de mamíferos placentários, entre eles os ancestrais dos cavalos, dos elefantes, dos ursos e da espécie humana, que rapidamente se expandiram pela Europa e Ásia. No Quaternário, ocorreram quatro períodos de frio muito intenso, conhecidos por glaciações ou períodos glaciais. Durante as glaciações, grandes massas de gelo expandiram-se a partir do Ártico e da Antártica, cobrindo extensas regiões da Europa, da Ásia e das Américas. A última glaciação terminou há apenas 11 mil anos. Desde então, nosso planeta se aqueceu, a humanidade desenvolveu a agricultura, surgiram as cidades e a civilização moderna teve início.

LEITURA

SERÁ QUE A EVOLUÇÃO LEVA AO PROGRESSO E, FINALMENTE, À PERFEIÇÃO?

No século XVIII era amplamente aceita a idéia de que o mundo havia sido idealizado com extrema perfeição por Deus; mesmo onde a perfeição não havia ainda sido atingida, isso finalmente ocorreria, pois Deus idealizara leis que levariam naturalmente a ela. Essa crença refletia-se não somente no pensamento teológico, mas também no otimismo da corrente de pensamento denominada Iluminismo.

A teoria de Lamarck, por exemplo, postulava um caminho reto rumo à perfeição. Os evolucionistas modernos rejeitam a idéia de que a evolução leve à perfeição. A maioria deles acredita que algum tipo de processo evolucionário tenha ocorrido desde o começo da vida. A mudança gradual ao longo do tempo, de bactérias a seres unicelulares eucarióticos, e finalmente às plantas floríferas e animais superiores, é muitas vezes chamada de evolução progressiva. Essa terminologia tem sido freqüentemente utilizada para se referir à espécie humana como estágio final de uma série que levou dos répteis aos primitivos mamíferos, dos placentários aos macacos e, destes, aos hominídeos. Houve época em que era quase que universalmente aceito que a espécie humana era o ápice da Criação [...].

Será que a série que leva das bactérias à espécie humana significa, de fato, progresso? Nesse caso, como este poderia ser explicado? Nos últimos anos, muitos livros têm debatido a existência ou a validade do conceito de progresso evolutivo. A grande discussão é quanto ao significado da palavra "progresso". Por exemplo, os que adotam um pensamento teleológico [finalista] diriam que o progresso é um autodirecionamento rumo à perfeição. [...] Outros podem definir progresso de forma empírica, como a aquisição de algo que seja, de alguma maneira, melhor, mais eficiente e mais bem-sucedido que aquilo que o precedeu. Termos como "superior" e "inferior" também têm sido criticados. Para o darwinismo moderno, superior significa mais recente no tempo geológico ou mais acima na árvore filogenética. Mas, um organismo é "melhor" por ser superior na árvore filogenética?

Progresso costuma ser associado a maior complexidade, divisão de trabalho mais avançada entre órgãos corporais, melhor utilização dos recursos do ambiente e melhor adaptação. Isso pode ser verdadeiro em certos casos, mas os crânios de aves e mamíferos atuais não são mais complexos que os de seus ancestrais. [...]

Ao olharmos para a série evolucionária, não podemos negar que alguns grupos de organismos têm adaptações particularmente bem-sucedidas. A endotermia, por exemplo, permite maior adaptação de aves e mamíferos às flutuações climáticas. Um cérebro grande e o cuidado com a prole permitem o desenvolvimento cultural e a transmissão da cultura de geração a geração. [...]

Entre as muitas definições de progresso evolutivo, eu particularmente gosto de uma, que enfatiza sua natureza adaptacionista. Progresso é "a tendência que as linhagens têm de desenvolver adaptação cumulativa aos seus modos de vida, pelo aumento de características que se combinam em complexos adaptativos" (Richard Dawkins, *Evolution* 51: 1016, 1997).

- **Fonte:** Ernst Mayr, *What evolution is.* Nova York: Basic Books, Perseus Book Group, 2001, p. 213-215. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

11.1 Processo evolutivo e diversificação da vida

1. O que é anagênese e qual a sua relação com microevolução?

2. O que é, em linhas gerais, a cladogênese?

3. O que se entende por macroevolução?

4. No contexto da teoria evolucionista, o que é gradualismo filético e quais foram os motivos que levaram os cientistas a questioná-lo?

5. Em que consiste a idéia do equilíbrio pontuado, no contexto da evolução das espécies?

6. O que são rélicos? Como o modelo do equilíbrio pontuado explica tal fenômeno?

7. Em que consiste o conceito tipológico de espécie, empregado originalmente por Lineu no século XVIII?

8. Em que consiste o conceito de espécie enunciado por Ernst Mayr em 1942? Quais são suas limitações?

9. Justifique a seguinte afirmação: "A espécie pode ser considerada unidade reprodutiva, ecológica, genética e evolutiva da vida".

10. O que são subespécies e como elas surgem?

11.2 A origem de novas espécies

11. Conceitue especiação alopátrica.

12. O que é especiação dicopátrica?

13. O que significa dizer que duas populações apresentam isolamento reprodutivo?

14. Apresente brevemente as idéias centrais da especiação peripátrica.

15. O que é especiação simpátrica?

16. Como a poliploidia poderia levar à formação de novas espécies? Explique e exemplifique.

17. O que são processos de isolamento reprodutivos pré-zigóticos e pós-zigóticos?

18. Explique resumidamente, exemplificando, em que consistem os seguintes processos pré-zigóticos de isolamento reprodutivo: a) de hábitat; b) sazonal (estacional); c) etológico ou comportamental; d) mecânico.

19. Explique resumidamente, exemplificando, em que consistem os seguintes processos pós-zigóticos de isolamento reprodutivo: a) inviabilidade do híbrido; b) esterilidade do híbrido; c) deterioração de F_2.

11.3 Origem dos grandes grupos de seres vivos

20. O que é e como se divide o tempo geológico?

21. O que marca o limite entre as eras Pré-cambriana e Paleozóica?

22. O que marca o limite entre as eras Paleozóica e Mesozóica?

23. O que marca o limite entre as eras Mesozóica e Cenozóica?

24. Como e quando teria surgido a multicelularidade?

25. Quais teriam sido os primeiros seres vivos a conquistar os ambientes de terra firme?

26. Comente a origem dos tetrápodes.

27. Qual foi a época de expansão dos anfíbios?

28. Comente as inovações evolutivas que permitiram a grande expansão da vegetação nos continentes.

29. Comente brevemente a história evolutiva dos répteis.

30. Comente a grande expansão e posterior declínio dos dinossauros.

31. Comente brevemente a história evolutiva das aves.

32. Comente brevemente a origem e a expansão dos mamíferos.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

33. Considere as seguintes informações sobre fatos e acontecimentos referentes ao processo de especiação e indique a alternativa que os ordena na seqüência em que atuam no processo de formação de duas novas espécies, a partir de uma população ancestral.

I. Populações que se cruzam livremente.
II. Acúmulo de diferenças genéticas entre as populações.
III. Estabelecimento de isolamento reprodutivo entre as populações.
IV. Aparecimento de barreira geográfica entre as populações.

a) I → II → III → IV.
b) I → II → IV → III.
c) I → III → II → IV.
d) I → IV → II → III.

34. Qual é a única era geológica em que os períodos são subdivididos em épocas?

a) Cenozóica.
b) Mesozóica.
c) Paleozóica.
d) Pré-cambriana.

35. Uma "explosão" de aparecimento de fósseis, indicando o surgimento de muitas novas espécies de seres vivos, marca o início de qual era geológica?
a) Cenozóica.
b) Mesozóica.
c) Paleozóica.
d) Pré-cambriana.

36. Na península de Yucatán, no México, há vestígios da queda de um grande meteorito ocorrida há cerca de 65 milhões de anos, que teria desencadeado mudanças climáticas que levaram a um grande número de extinções, entre elas a da maioria das espécies de dinossauros. Essas extinções marcam a transição entre as eras
a) Cenozóica → Pré-cambriana.
b) Mesozóica → Cenozóica.
c) Paleozóica → Mesozóica.
d) Pré-cambriana → Paleozóica.

37. As evidências científicas permitem supor que a vida na Terra surgiu
a) há 10 mil anos.
b) entre 4,5 e 5 milhões de anos atrás.
c) há 65 milhões de anos.
d) entre 3,5 e 4 bilhões de anos atrás.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 38 a 41.
a) Cenozóica.
b) Mesozóica.
c) Paleozóica.
d) Pré-cambriana.

38. Em que era geológica surgiu a espécie humana?

39. Em que era geológica ocorreu a chamada "explosão cambriana" de diversificação da vida?

40. Em que era geológica ocorreu a formidável diversificação e expansão dos dinossauros?

41. Em que era geológica ocorreu a conquista da terra firme pelos ancestrais dos anfíbios?

42. Os peixes de nadadeiras lobadas, os crossopterígios, foram os prováveis ancestrais imediatos de
a) anfíbios.
b) aves e mamíferos.
c) peixes ósseos.
d) répteis.

43. Ovos dotados de casca impermeável representaram uma novidade evolutiva importante, garantindo a independência de água líquida para a reprodução e a verdadeira conquista do ambiente de terra firme. Em que grupo de animais isso ocorreu?
a) Anfíbios.
b) Aves.
c) Mamíferos.
d) Peixes.
e) Répteis.

QUESTÕES DISCURSIVAS

44. Os evolucionistas consideram muito improvável que a espécie humana venha a se diversificar em novas espécies no futuro. Qual é o principal argumento a favor dessa idéia?

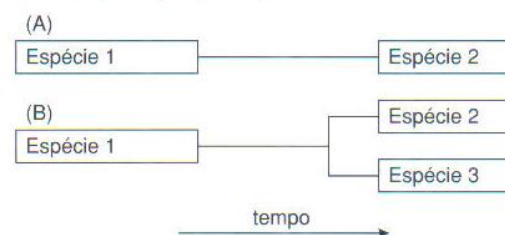
45. Duas populações oriundas da fragmentação de uma mesma população original ficaram isoladas geograficamente por um longo período de tempo. Descreva as diferentes situações que podem ocorrer, em relação ao isolamento reprodutivo, se essas populações voltarem a se juntar pelo desaparecimento da barreira geográfica entre elas.

46. Duas espécies de mosca norte-americanas, do gênero *Drosophila*, *D. pseudobscura* e *D. persimilis*, apresentam um complexo ritual de corte em que os machos estendem uma das asas, vibrando-as para produzir um som que é característico de cada uma das espécies. A fêmea só cruzará com machos que produzirem o sinal correto, típico da espécie. Entretanto, nas condições pouco naturais e superpovoadas das caixas de laboratório, onde são cultivadas essas moscas, aparecem híbridos entre as duas espécies, principalmente se as moscas forem mantidas a uma temperatura de 16 °C.
a) Qual é a justificativa para classificar *D. pseudobscura* e *D. persimilis* como espécies diferentes?
b) Como pode ser classificado o tipo de isolamento reprodutivo entre essas duas espécies de drosófila? Justifique sua resposta.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

47. (Unesp) Correlacione os fenômenos enumerados com os algarismos arábicos 1, 2, 3 e 4 às definições ou aos conceitos, expressos nas afirmativas de I a IV.
1: Evolução.
2: Mutação.
3: Adaptação.
4: Especiação.
I. Modificações nas freqüências gênicas das populações através do tempo, orientadas pela seleção natural.
II. Modificação ao acaso nos genes ou cromossomos, acarretando variação genética.
III. Modificações de estruturas e funções em um grupo, que favorecem sua sobrevivência.
IV. Determinada pelo isolamento reprodutivo, que pode ter como causa o isolamento geográfico.
A alternativa correta é
a) I-4; II-2; III-3; IV-1.
b) I-3; II-1; III-2; IV-4.
c) I-2; II-3; III-4; IV-1.
d) I-1; II-2; III-3; IV-4.
e) I-1; II-3; III-4; IV-2.

48. (UFRGS-RS) O esquema abaixo refere-se a dois modelos de especiação (A e B).

Considere as afirmações abaixo relacionadas ao esquema.

I. O modelo A representa um exemplo de especiação filética, que pressupõe a ocorrência de isolamento geográfico.

II. O modelo A representa especiação por anagênese, que envolve seleção natural e adaptação a modificações graduais nas condições ambientais.

III. O modelo B representa especiação por cladogênese, que envolve isolamento de populações, adaptação a diferentes ambientes e isolamento reprodutivo.

Quais estão corretas?

a) Apenas I.
b) Apenas II.
c) Apenas III.
d) Apenas I e III.
e) Apenas II e III.

49. (PUC-RJ) Leia as afirmativas abaixo, com relação à evolução dos seres vivos.

I. O mecanismo da evolução caracteriza-se basicamente por uma mudança na freqüência de certos genes na população, causada por mutação, seleção natural, isolamento geográfico e reprodutivo ou deriva genética.

II. Quando, através do isolamento geográfico, uma população se torna diferente da população original e atinge um isolamento reprodutivo, dizemos que surgiu uma nova espécie.

III. A mutação é uma alteração na seqüência de bases do DNA, podendo ser espontânea ou provocada por agentes ambientais. Somente as mutações que ocorrem nas células reprodutoras têm importância evolutiva.

IV. Segundo Darwin, através da seleção natural, as espécies serão representadas por indivíduos cada vez mais adaptados ao ambiente em que vivem.

Dessas afirmativas, admitem-se como verdadeiras as indicadas na opção:

a) afirmativas I, II, III e IV.
b) apenas I e II.
c) apenas II e III.
d) apenas I, II e III.
e) apenas I, III e IV.

50. (UFMS) O texto abaixo foi extraído de uma reportagem sobre estudos recentes nos quais pesquisadores apresentaram evidências de que uma população de salmões originou duas novas espécies em pouco mais de 50 anos.

(...) Os cientistas presumiram que seria quase impossível assistir à evolução de uma nova espécie na natureza, um processo que era considerado longo demais para ser acompanhado durante o tempo de vida de qualquer ser humano. No entanto, pesquisadores que estudaram o salmão apresentaram evidências de que espécies novas podem evoluir muito mais rapidamente do que se julgava possível — em algumas dezenas de anos (...)

Adaptado do jornal O Estado de São Paulo, de 30 Outubro de 2000.

Há muita polêmica em torno das conclusões do estudo. Para refutar essas conclusões é preciso demonstrar que os salmões selecionados pelos pesquisadores são da mesma espécie. Para tanto basta provar que esses salmões

a) são morfologicamente muito semelhantes entre si e têm a mesma desenvoltura para nadar.
b) originam, pela reprodução, uma prole numerosa.
c) têm os mesmos hábitos, ocupam o mesmo hábitat e concorrem pelo mesmo tipo de alimento.
d) reproduzem-se entre si, transmitindo seus genes ao longo das gerações.
e) têm o mesmo número de cromossomos.

51. (Unifor-CE) Considere o texto a seguir.

"Em uma cidade, havia uma população de insetos na qual predominavam os indivíduos claros, que se confundiam com os liquens existentes na casca das árvores sobre os quais pousavam. Com a poluição, os liquens desapareceram e os troncos tornaram-se enegrecidos, beneficiando os insetos escuros. Verificou-se, então, que estes passaram a predominar sobre os insetos claros."

Ele relata um exemplo de

a) herança de caracteres adquiridos.
b) melhoramento genético.
c) mutação gênica.
d) especiação.
e) seleção natural.

52. (UFPI) Evolução é um processo biológico apresentado por um (uma)

a) célula.
b) tecido.
c) órgão.
d) organismo.
e) população.

53. (U. Tocantins-TO) Considere a seguinte frase a ser completada: "Sem (I) não há variabilidade; sem variabilidade não há (II) e, conseqüentemente, não há (III)". As palavras que substituindo os números tornam essa frase logicamente correta são

a) (I) = evolução (II) = seleção (III) = mutação
b) (I) = mutação (II) = seleção (III) = evolução
c) (I) = evolução (II) = mutação (III) = seleção
d) (I) = mutação (II) = evolução (III) = seleção
e) (I) = seleção (II) = mutação (III) = evolução

54. (Fatec-SP) Quando grupos de uma população se tornam isolados geograficamente, a diversificação gênica pode levar à formação de novas espécies.

Esse processo é denominado

a) adaptação.
b) especiação.
c) isolamento reprodutivo.
d) migração.
e) oscilação gênica.

55. (U. E. Londrina-PR) Na natureza, indivíduos de espécies diferentes raramente se acasalam. Algumas vezes isso acontece, resultando em embriões que não se desenvolvem ou em descendentes estéreis ou de fertili-

dade reduzida. Esse esforço reprodutivo, que nem sempre compensa, é resultado de

a) Recombinação gênica.
b) Mutação gênica.
c) Mecanismos que favorecem o acasalamento entre espécies diferentes.
d) Mecanismos que conduzem ao isolamento reprodutivo.
e) Ligação e permuta genética.

56. (Fatec-SP) Várias são as etapas do processo de especiação por cladogênese. Dentre elas citam-se:

I. Diferenciação do conjunto gênico de subpopulações isoladas;
II. Incapacidade dos membros de duas subpopulações se cruzarem, produzindo descendência fértil;
III. Separação física de duas subpopulações de uma espécie.

A seqüência correta dessas etapas é

a) I - II - III.
b) II - I - III.
c) II - III - I.
d) III - II - I.
e) III - I - II.

57. (UFPR) O geneticista Jeremy Rifkin, em publicação recente, faz reflexões sobre o impacto das novas tecnologias e avanços da engenharia genética em nossas vidas. No que se refere à transferência de genes entre espécies diferentes, sugere que certos conceitos sejam repensados: "Uma espécie biológica ... deve ser vista como um depósito de genes que são potencialmente transferíveis. Uma espécie não é meramente um volume de capa dura da biblioteca da natureza. Ela também é um livro de folhas soltas cujas páginas individuais, os genes, podem estar disponíveis para uma transferência seletiva e modificação de outras espécies".

(RIFKIN, J. O século da biotecnologia. São Paulo: Ed. Makron Books do Brasil, 1999. p. 36.)

Considerando o ponto de vista do autor, identifique nas alternativas abaixo o que é atualmente aceito como correto (V) sobre espécie e especiação.

a) Populações de uma mesma espécie, geograficamente isoladas, sofrem as mesmas mutações e processos de seleção natural, o que lhes permite ajustar-se às circunstâncias de cada ambiente.
b) A condição inicial para que haja a formação de raças é a seleção natural.
c) O isolamento geográfico é uma das condições para que haja especiação.
d) As diferenças genéticas entre duas populações de uma mesma espécie, quando isoladas geograficamente, tendem a se acentuar.
e) Membros de uma mesma espécie intercruzam-se livremente, dando origem a descendentes férteis.

58. (Unirio-RJ) O processo de evolução requer condições que produzam modificações na freqüência de um determinado alelo gênico. Dentre os fatores que podem alterar essa freqüência encontram-se:

I. mutação;
II. migração;
III. seleção;
IV. recombinação.

Os fatores que introduzem novos alelos na população são

a) I e II, apenas.
b) I e IV, apenas.
c) II e III, apenas.
d) II e IV, apenas.
e) III e IV, apenas.

59. (Unesp) Três populações de insetos, X, Y e Z, habitantes de uma mesma região e pertencentes a uma mesma espécie, foram isoladas geograficamente. Após vários anos, com o desaparecimento da barreira geográfica, verificou-se que o cruzamento dos indivíduos da população X com os da população Y produzia híbridos estéreis. O cruzamento dos indivíduos da população X com os da população Z produzia descendentes férteis, e o dos indivíduos da população Y com os da população Z não produzia descendentes.

A análise desses resultados permite concluir que

a) X, Y e Z continuaram pertencendo à mesma espécie.
b) X, Y e Z formaram três espécies diferentes.
c) X e Z tornaram-se espécies diferentes e Y continuou a pertencer à mesma espécie.
d) X e Z continuaram a pertencer à mesma espécie e Y tornou-se uma espécie diferente.
e) X e Y continuaram a pertencer à mesma espécie e Z tornou-se uma espécie diferente.

60. (UFPel-RS) "Fóssil de animal pré-histórico é encontrado no município de Santa Maria por equipe de paleontólogos alemães."

Essa frase possivelmente apareceu nos maiores jornais do Estado, ao final dos anos vinte, com as primeiras descobertas paleontológicas de répteis no Estado. Ao analisarmos a quantidade de répteis fósseis no período Triássico do Rio Grande do Sul (180 milhões de anos), é possível notar que a maior parte deles é composta por dicinodontes e rincossauros, ambos herbívoros. São raríssimos os exemplares encontrados de tecodontes carnívoros.

A partir dessas informações, você poderia concluir que, nesse ecossistema pré-histórico,

a) o número de presas era menor que o de predadores, fato comum até mesmo nas cadeias alimentares atuais.
b) o número de presas era maior que o de predadores, fato observado nas cadeias alimentares atuais.
c) os dicinodontes e os rincossauros eram mais numerosos porque predavam os tecodontes.
d) os tecodontes eram menos numerosos porque concorriam pelo mesmo alimento com os dicionodontes e os rincossauros.
e) os rincossauros predavam os dicinodontes, concorrendo, assim, diretamente com os tecodontes, promovendo o declínio de sua população.

61. (Fuvest-SP) Considere os seguintes eventos evolutivos:

I. Extinção dos dinossauros.

II. Origem das plantas gimnospermas.

III. Origem da espécie humana.

Qual das alternativas indica a ordem temporal correta em que esses eventos aconteceram?

a) I → II → III

b) I → III → II

c) II → I → III

d) II → III → I

e) III → I → II

QUESTÕES DISCURSIVAS

62. (UFC-CE) "Em 1997, no município de Monte Alto, noroeste de São Paulo, foram encontrados fósseis de uma espécie ainda desconhecida de dinossauros, pertencente à família dos titanossauros, que viveu há 85 milhões de anos. A diferença entre o dinossauro de Monte Alto e as três dezenas de titanossauros já identificadas está na forma das vértebras do animal, nunca antes vista. Além disso, os pesquisadores já constataram que o novo titanossauro, um adulto em seus 15 metros de comprimento e 15 toneladas, era menor e mais leve do que os espécimes encontrados na Argentina, que chegavam a medir 25 metros e a pesar 25 toneladas. Segundo Reinaldo Bertini, professor da Universidade Estadual Paulista (Unesp), 'isso mostra que os dinossauros dessa região do Brasil provavelmente evoluíram de maneira distinta dos de outras áreas da América do Sul'."

(Revista *Veja*, 12 de agosto de 1998)

De acordo com a teoria darwinista, os dinossauros de Monte Alto e da Argentina tiveram um ancestral comum. Para os neodarwinistas, mecanismos evolutivos de VARIAÇÃO, DIREÇÃO e ESPECIAÇÃO atuaram sobre os dois grupos, levando-os a caminhos evolutivos distintos. Com base no exposto acima:

a) Cite dois mecanismos responsáveis pelo surgimento de VARIAÇÕES nos dois grupos de dinossauros (do Brasil e da Argentina).

b) Cite o mecanismo evolutivo que DIRECIONOU a formação distinta dos dois grupos.

c) Cite o mecanismo responsável pela ESPECIAÇÃO.

63. (Fuvest-SP) Em conseqüência do aparecimento de uma barreira geográfica, duas populações de uma mesma espécie ficaram isoladas por milhares de anos, tornando-se morfologicamente distintas uma da outra.

a) Como se explica o fato de as duas populações terem se tornado morfologicamente distintas no decorrer do tempo?

b) Cite as duas situações que podem ocorrer, no caso de as populações voltarem a entrar em contato pelo desaparecimento da barreira geográfica. Em que situação se considera que houve especiação?

64. (Fuvest-SP) Os fatos a seguir estão relacionados ao processo de formação de duas espécies a partir de uma ancestral:

I. Acúmulo de diferenças genéticas entre as populações.

II. Estabelecimento de isolamento reprodutivo.

III. Aparecimento de barreira geográfica.

a) Qual é a seqüência em que os fatos anteriores acontecem na formação das duas espécies?

b) Que mecanismos são responsáveis pelas diferenças genéticas entre as populações?

c) Qual é a importância do isolamento reprodutivo no processo de especiação?

65. (Fuvest-SP) É comum o cruzamento entre jumento e égua para se obter o híbrido conhecido como burro. Este, apesar de seu vigor físico, é estéril.

a) Sabendo-se que o número diplóide de cromossomos do jumento é 62 e o da égua 64, quantos cromossomos devem estar presentes em cada célula somática do burro?

b) Com base no conceito biológico de espécie, o jumento e a égua pertencem à mesma espécie? Por quê?

66. (Unesp) As populações A, B, C e D vivem em quatro regiões geográficas diferentes. Quando os indivíduos dessas populações foram colocados juntos, cruzaram-se e os resultados obtidos foram os seguintes:

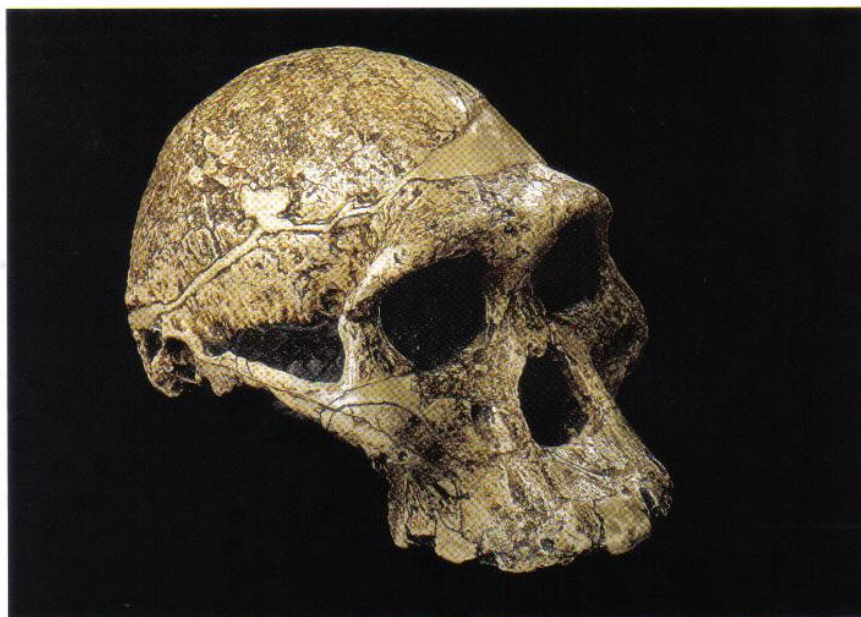
Cruzamento	Descendentes
A × B	férteis
A × D	férteis
B × C	estéreis
B × D	férteis
C × D	estéreis

a) O que se pode concluir do fato de os cruzamentos A × B, A × D e B × D terem produzido descendentes férteis? Que fator inicial poderia ter dado origem às populações A, B, C e D?

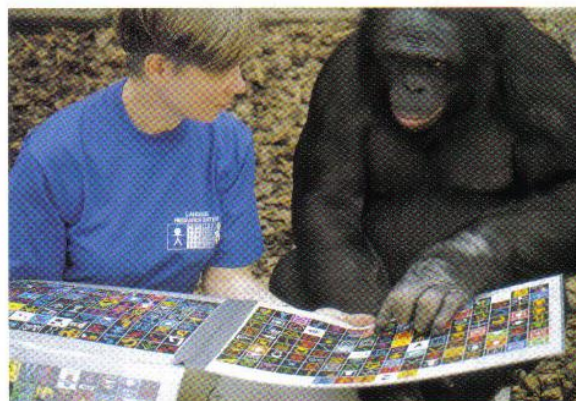
b) Que nome se dá às espécies diferentes que vivem numa mesma região geográfica? Indique um exemplo de animais vertebrados que, quando cruzados entre si, produzem descendentes estéreis.

CAPÍTULO

12 EVOLUÇÃO HUMANA

▶ Crânio fossilizado de *Australopithecus africanus*, que viveu há mais de 2 milhões de anos.

12.1 Nosso parentesco com os animais

Até o século XVIII, a espécie humana era considerada inteiramente diferente de todos os outros seres vivos, visão compartilhada por eminentes teólogos e filósofos, como Kant e Descartes. Entretanto, as semelhanças entre seres humanos e chimpanzés já haviam sido notadas por Lineu, que classificou esses macacos antropóides no gênero *Homo*.

Darwin foi o primeiro a propor nossa relação de parentesco evolutivo com os grandes macacos, incluindo definitivamente a espécie humana no reino Animal e, de certa forma, destronando-a do ponto mais alto da criação. Embora Darwin tenha sido cauteloso em suas proposições, alguns de seus contemporâneos, como Thomas Huxley e Ernst Haeckel, defenderam vigorosamente a idéia equivocada de que nossa espécie se originara diretamente de macacos como o gorila e o chimpanzé. Segundo os evolucionistas atuais, porém, esses antropóides e a espécie humana tiveram um ancestral em comum há relativamente pouco tempo, possivelmente entre 8 milhões e 5 milhões de anos atrás. **(Fig. 12.1)**

▲ **Figura 12.1** • A semelhança entre bonobos ("chimpanzés-pigmeus") e seres humanos não é casual, mas decorre do fato de termos ancestrais em comum. A diversificação entre as linhas evolutivas do chimpanzé e dos hominídeos parece ter ocorrido entre 8 e 5 milhões de anos atrás.

Evidências da evolução humana

Os cientistas consideram basicamente três tipos de evidências para desvendar o parentesco e a história evolutiva dos organismos: semelhanças anatômicas e fisiológicas entre grupos de organismos, fósseis e semelhanças moleculares. Vamos analisar como essas evidências têm sido empregadas no estudo da evolução humana.

Os seres humanos apresentam grandes **semelhanças anatômicas** com os macacos antropóides, principalmente com o chimpanzé. As diferenças resumem-se, basicamente, à proporção entre braços e pernas, ao grau de mobilidade do primeiro dedo, à distribuição dos pêlos corporais e à dentição. Além disso, o encéfalo humano é proporcionalmente maior que o do chimpanzé. A capacidade craniana, que reflete o tamanho do encéfalo, é da ordem de 1.350 cm^3 na espécie humana e de cerca de 400 cm^3 nos chimpanzés. **(Fig. 12.2)**

▲ **Figura 12.2** • Os estudos de anatomia comparada têm revelado as inúmeras semelhanças entre a espécie humana e os grandes antropóides como o chimpanzé. A foto mostra um modelo da coluna vertebral de um australopiteco nas mãos de um pesquisador. As sombras projetadas mostram a coluna vertebral humana (à esquerda) e a de um chimpanzé.

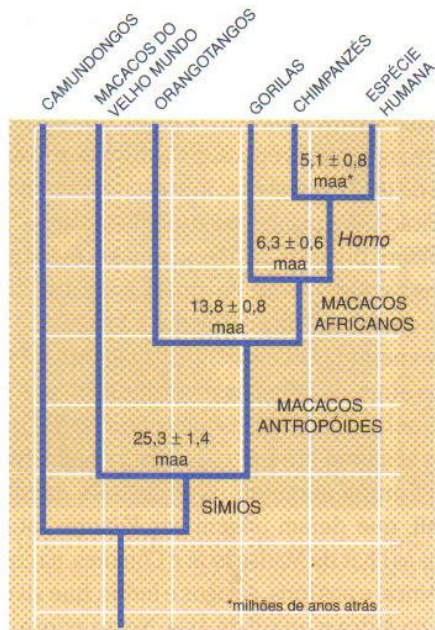
Quanto aos **fósseis**, Charles Darwin previu, em 1871, que seriam encontrados vestígios de ancestrais humanos na África. Ele se baseou no fato de que gorilas e chimpanzés — nossos parentes mais próximos, segundo sua teoria — só eram encontrados nesse continente, onde deviam ter vivido os ancestrais comuns à espécie humana e a esses animais. Na época, essas conclusões não foram bem recebidas pelo mundo científico. Além da falta de evidências que comprovassem a hipótese de Darwin, havia uma certa predisposição da cultura européia em rejeitar a idéia de que o berço da humanidade havia sido o continente africano.

Até a década de 1920, fósseis claramente relacionados à ancestralidade humana tinham sido encontrados apenas na Europa e na Ilha de Java, na Indonésia. Foi somente em 1924 que Raymond Dart (1893-1989), um professor de anatomia australiano, encontrou pela primeira vez, na África, o crânio fóssil de um hominídeo, classificado com *Australopithecus africanus*. Conta-se que Dart levou mais de dois meses escavando a rocha ao redor do fóssil com uma pequena lâmina, até libertá-lo totalmente. Logo em seguida, ocorreram novos achados. No período entre 1936 e 1940, o médico escocês e paleontologista amador Robert Broom (1866-1951) descobriu, em uma caverna do sul da África, outros fósseis de *A. africanus* e um fóssil de outro hominídeo, chamado então de *Paranthropus robustus* (atualmente classificado como *Australopithecus robustus*).

Outros paleontólogos conhecidos por suas descobertas de fósseis da linhagem humana são Louis Leakey e sua esposa, Mary Leakey. Eles encontraram, em 1959, fósseis de um novo australopiteco (*A. boisei*). Em 1978, Mary Leakey descobriu pegadas fósseis deixadas em cinza vulcânica por três prováveis australopitecos.

O documentário fóssil sobre a história evolutiva humana ainda é muito incompleto no período que vai de 13 milhões a 6 milhões de anos atrás. Foi nesse intervalo que provavelmente ocorreu a diversificação das linhagens que originaram gorilas, chimpanzés e seres humanos. Recentemente foram descobertos fósseis importantes de primeiros hominídeos, datados entre 6,5 milhões e 5,5 milhões de anos, como o *Sahelanthropus* e o *Orrorin*. Esses hominídeos viveram, provavelmente, logo após a separação da linhagem humana daquela que originou os chimpanzés.

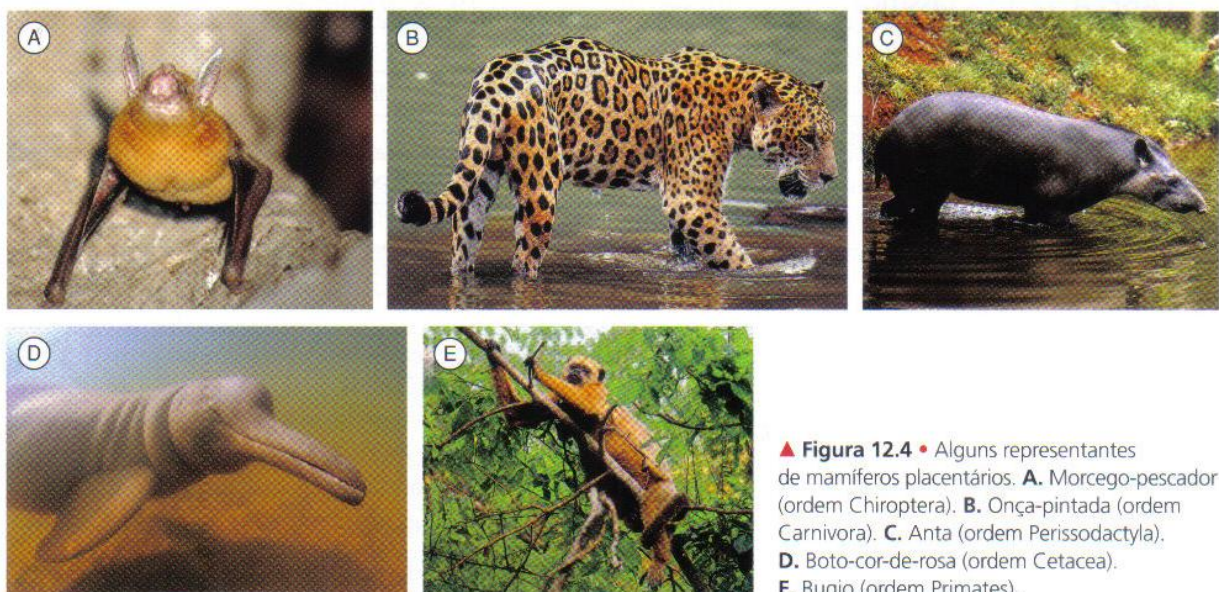
A maioria dos fósseis da linhagem humana resume-se apenas a partes de indivíduos, como fragmentos de mandíbula, dentes, partes do crânio e de membros etc.; raramente encontram-se fósseis de indivíduos completos. Por isso, qualquer tentativa de reconstituir a estrutura corporal do ser quando vivo exige um estudo exaustivo e rigoroso. Outra dificuldade dos cientistas é que, mesmo sendo possível reconstituir a aparência de um indivíduo a partir de seus fósseis, não se sabe qual é o grau de variação existente naquela espécie, isto é, se o indivíduo fossilizado é realmente representativo de sua linhagem. Evidentemente, à medida que novos fósseis são encontrados, certas hipóteses são reforçadas, enquanto outras têm de ser reformuladas; é assim que o conhecimento sobre a história evolutiva humana progride. Com certeza, ainda ocorrerão muitas mudanças no quadro atual da classificação humana, apresentado neste capítulo.

Um grande avanço nos estudos de evolução deve-se à constatação de que as moléculas orgânicas dos seres vivos evoluem segundo os mesmos princípios que as características anatômicas e fisiológicas. Conseqüentemente, as **semelhanças moleculares**, do mesmo modo que as semelhanças anatômicas, ajudam a inferir o grau de parentesco evolutivo entre os organismos. Recentemente fizeram-se comparações detalhadas entre ácidos nucléicos e proteínas dos mais diversos seres vivos. No caso da espécie humana, os resultados das análises comparativas mostraram que, de fato, os chimpanzés são mais semelhantes a nós, do ponto de vista molecular, que qualquer outro ser vivo. **(Fig. 12.3)**

▲ **Figura 12.3** • Filogenia publicada em um artigo da revista científica *New Scientist*, de maio de 2003, que mostra as estimativas de tempo de divergência evolutiva na linhagem dos primatas (ordem a que pertencem macacos antropóides e seres humanos), estimadas com base na comparação de DNA. O artigo sugere que chimpanzés e seres humanos sejam incluídos no mesmo gênero, *Homo*.

12.2 A classificação da espécie humana

Os seres humanos fazem parte da classe Mammalia (mamíferos), que compreende animais de sangue quente, com pêlos corporais e que se alimentam de leite na fase jovem. Acredita-se que os mamíferos tenham surgido entre 250 milhões e 240 milhões de anos atrás, a partir de um grupo primitivo de répteis. Nessa época, as populações de dinossauros estavam diversificando-se e expandindo-se, para se tornar o grupo dominante em terra firme até 65 milhões de anos atrás, quando se extinguiram subitamente. Durante o período de domínio dos grandes répteis, os mamíferos mantiveram-se pouco diversificados (relembre esses assuntos no capítulo 11).

A extinção dos dinossauros marcou o fim da era Mesozóica e o início da era Cenozóica, na qual nos encontramos. O declínio dos répteis abriu espaço para uma grande diversificação dos mamíferos, atualmente adaptados aos mais diversos ***hábitats*** da Terra.

Entre os primeiros mamíferos, surgiram pelo menos três linhagens, que diferiam basicamente quanto ao modo de reprodução: monotremados, marsupiais e placentários. A primeira linhagem originou os monotremados atuais — ornitorrincos e equidnas, que são mamíferos ovíparos. A segunda originou os marsupiais atuais, cujos representantes mais conhecidos são os cangurus e os gambás; a característica típica dos marsupiais é que os filhotes nascem imaturos e terminam o desenvolvimento no marsúpio, uma bolsa de pele no ventre da fêmea. A terceira linhagem originou os placentários, grupo a que pertence a maioria dos mamíferos atuais, inclusive nossa espécie. Nos placentários, o desenvolvimento embrionário ocorre inteiramente no interior do útero materno, e o embrião é nutrido através da placenta. A estratégia placentária garantiu a esses animais grande sucesso adaptativo, como atesta o grande número de espécies de mamíferos placentários atuais. **(Fig. 12.4)**

▲ **Figura 12.4** • Alguns representantes de mamíferos placentários. **A.** Morcego-pescador (ordem Chiroptera). **B.** Onça-pintada (ordem Carnivora). **C.** Anta (ordem Perissodactyla). **D.** Boto-cor-de-rosa (ordem Cetacea). **E.** Bugio (ordem Primates).

A ordem Primates

A espécie humana é atualmente classificada, juntamente com os prossímios, társios e macacos, na ordem **Primates** da classe Mammalia. A classificação, em categorias inferiores à de ordem, ainda é controversa. Neste livro, adotamos uma classificação baseada em Ernst Mayr, apresentada no livro *What evolution is*, de 2002. **(Tab.12.1)**

História evolutiva dos primatas

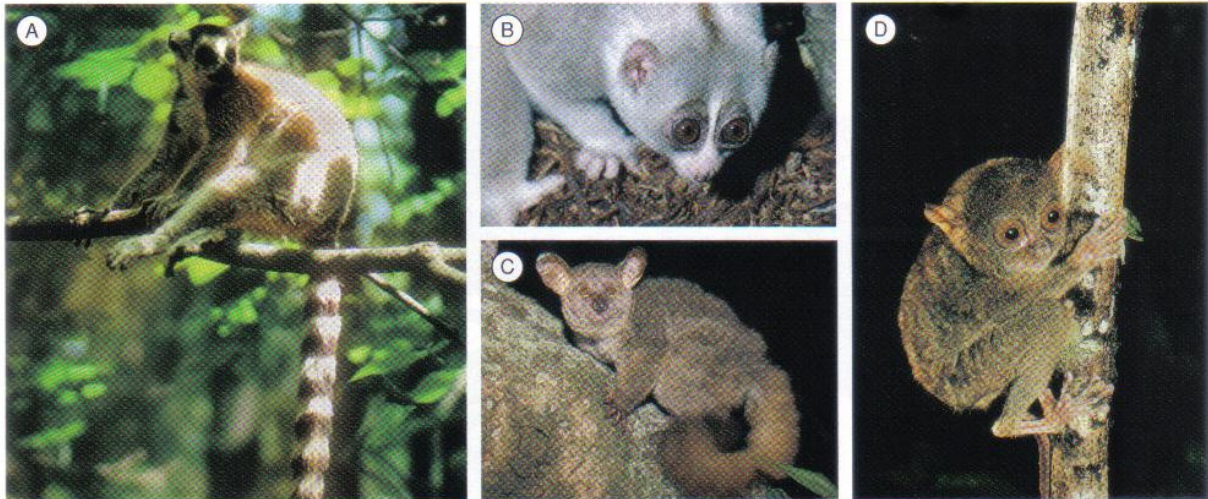
Acredita-se que os primatas tenham surgido por volta de 70 milhões de anos atrás, no final do período Cretáceo, pouco antes da extinção dos grandes répteis. Um fóssil supostamente pertencente ao ancestral de todos primatas é o *Purgatorius unio*, um animal pequeno, do tamanho de um esquilo, de hábitos noturnos e que provavelmente se alimentava de insetos, parecido com os musaranhos atuais, pertencentes à ordem Insetivora. **(Fig. 12.5)**

▲ **Figura 12.5** • O musaranho-das-árvores se parece com os mamíferos insetívoros que originaram os primatas, há mais de 70 milhões de anos.

O fóssil do mais antigo primata conhecido é o *Plesiadapis*, animal de pequeno porte, com peso de 1 kg a 3 kg, que viveu nas florestas da Europa e América do Norte e, provavelmente, também da África, há cerca de 60 milhões de anos. Nessa época, o clima voltava a ser quente, depois de uma longa glaciação, e estava ocorrendo grande diversificação das plantas angiospermas (plantas frutíferas). Os primeiros primatas logo se adaptaram à vida nas florestas em expansão, vivendo na copa das árvores e suplementando a dieta insetívora com frutas e folhas.

No período Eoceno, entre 53 milhões e 34 milhões de anos atrás, os primatas diversificaram-se e expandiram-se pelas florestas do Hemisfério Norte, que nessa época chegavam até perto do círculo polar. Nas florestas da Europa surgiram os ancestrais da **subordem Prosimii**, que deram origem aos lêmures, atualmente restritos às ilhas de Madagáscar e Comores, na costa oriental da África, e aos lóris, gálagos e indris, que vivem atualmente na África e no sul da Ásia. Nessa época, surgiram também os ancestrais da **subordem Tarsiiformes**, os társios, que atualmente vivem no sul da Ásia. Os társios são bem adaptados à vida nas árvores; sua tíbia e fíbula são fundidas e dois de seus ossos tarsais são muito alongados, daí o nome do grupo. As relações de parentesco evolutivo e a classificação desses primatas ainda são controversas. Na tabela 12.1, em que a classificação reflete a filogenia baseada principalmente no registro fóssil, os társios estão separados dos prossímios. Filogenias construídas com base nas semelhanças de DNA e proteínas (veja mais adiante), entretanto, sugerem que társios, gálagos e lóris sejam mais relacionados entre si do que com os lêmures. **(Fig. 12.6)**

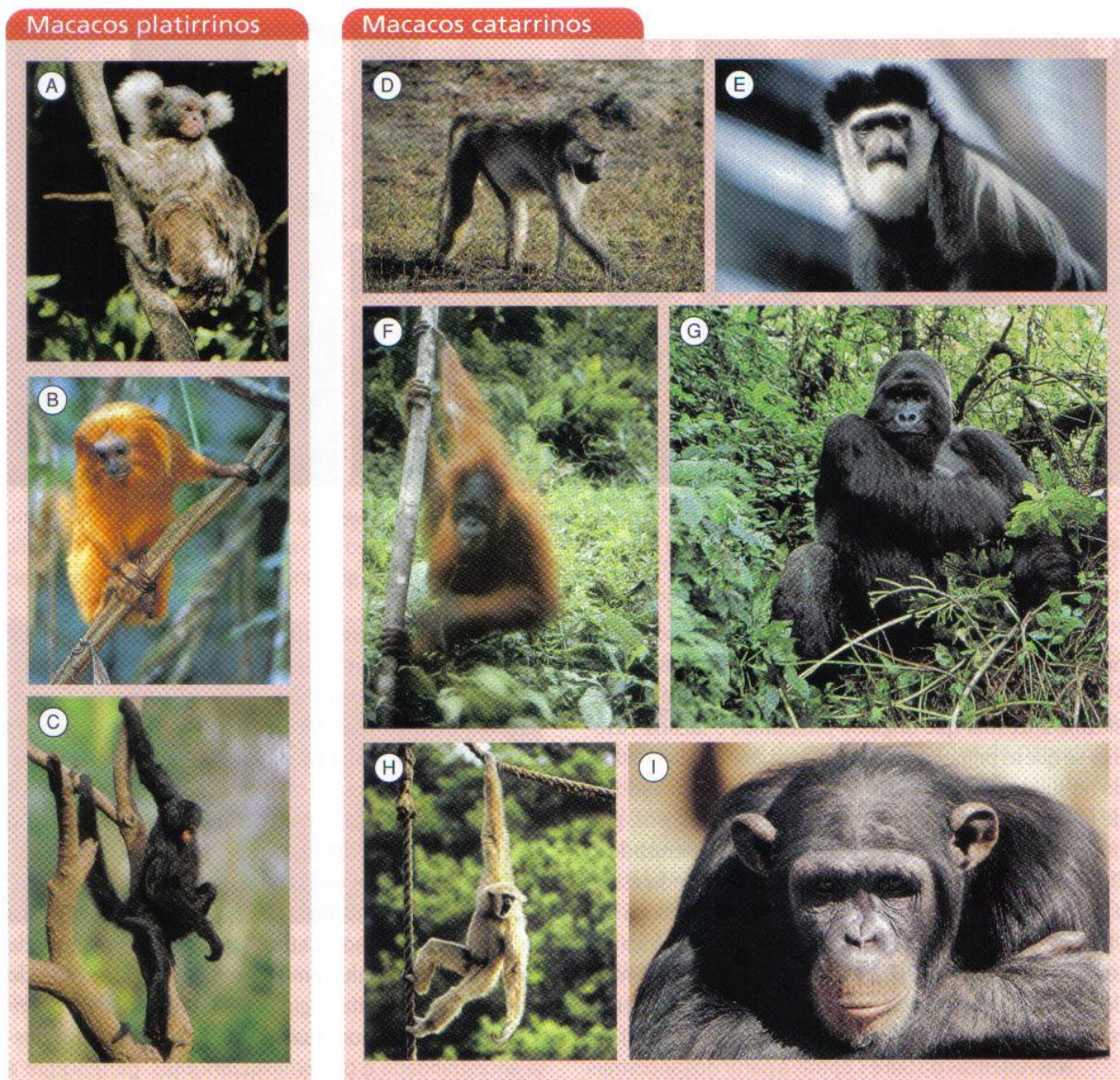
TABELA 12.1 • Classificação da espécie humana entre os primatas

Ordem Primates					
	Subordem **Prosimii** ou **Strepshirrini**	Infra-ordem **Lemuriformes**: lêmures.			
		Infra-ordem **Lorisiformes**: lóris, gálagos e indris.			
	Subordem **Tarsiiformes**: társios.				
	Subordem **Anthropoidea**	Infra-ordem **Platyrrhini**: macacos do Novo Mundo (ex.: sagüis, macacos-pregos etc.).			
		Infra-ordem **Catarrhini**			
			Superfamília **Cercopithecidea**: macacos do Velho Mundo (ex.: babuínos, mandris, colobos etc.).		
			Superfamília **Hominoidea**: antropóides.		
				Família **Hylobatidae**: gibão.	
				Família **Hominidae**	
					Subfamília **Ponginae**: orangotangos (gênero *Pongo*).
					Subfamília **Homininae**: gorilas (gênero *Gorilla*), chimpanzés (gênero *Pan*) e seres humanos (*Homo sapiens*).

▲ **Figura 12.6** • Lêmur (**A**), gálago (**B**), lóris (**C**) e társio (**D**) são primatas e constituem os grupos de animais mais aparentados aos macacos e à espécie humana.

Os **macacos**, ou símios, como são chamados os representantes da **subordem Anthropoidea**, surgiram entre 33 milhões e 24 milhões de anos atrás, provavelmente do mesmo ancestral que originou prossímios e társios. Acredita-se que as primeiras espécies desse grupo tenham surgido no sul da África, vivendo nas árvores e alimentando-se de folhas e frutos. De acordo com alguns estudiosos, grupos desses macacos teriam acidentalmente cruzado o Oceano Atlântico em jangadas naturais, invadindo assim a América do Sul. Isso seria possível, segundo dados geológicos, porque nessa época a costa oeste da África e a costa leste da América do Sul situavam-se a pouco mais de 1.000 km de distância (relembre o item sobre deriva continental no capítulo 2 do volume 1 desta coleção).

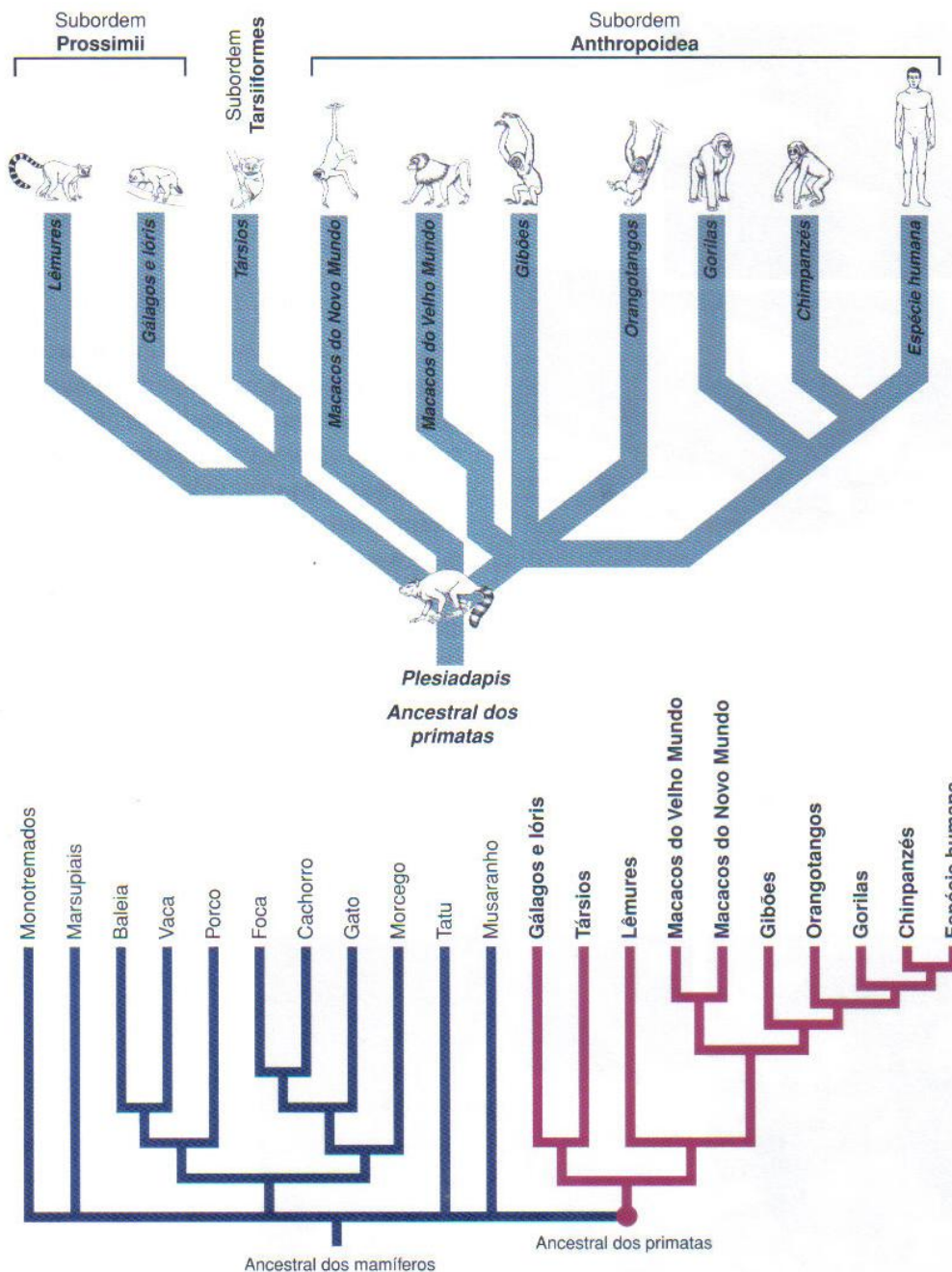
Nas Américas do Sul e Central, a partir dos ancestrais africanos mencionados acima, teriam surgido os **platirrinos**, pertencentes à infra-ordem Platyrrhini (do grego *platys*, achatado, e *rinós*, nariz, que têm nariz achatado) da subordem Anthropoidea. Esses primatas são também chamados de **macacos do Novo Mundo**, por serem atualmente encontrados apenas nas Américas do Sul e Central. Possuem face achatada e seus olhos são voltados para a frente, o que possibilita a visão estereoscópica (em profundidade), característica importante para calcular as distâncias, o que é necessário para se deslocar em segurança de um galho a outro, na copa das árvores. Os platirrinos apresentam 36 dentes e a maioria tem cauda preênsil, isto é, que permite se agarrar fortemente às árvores. De acordo com a classificação de Szalay & Delson (1979), a infra-ordem dos platirrinos é dividida em duas famílias: Cebidae (sagüis, mico-leão-dourado, mico-leão-de-cara-preta etc.) e Atelidae (macaco-aranha, mono-carvoeiro, guariba, uacari etc.). Muitas espécies de macacos platirrinos brasileiros já estão irremediavelmente extintas no ambiente natural, ou sob séria ameaça de extinção.

Há cerca de 33 milhões de anos, ou pouco menos, surgiram no norte da África os ancestrais dos **catarrinos** (infra-ordem Catarrhini da subordem Anthropoidea), grupo a que pertencemos. Os catarrinos têm crânio semelhante ao dos platirrinos, mas o nariz é mais estreito e a dentição é constituída por 32 dentes. Um fóssil representativo desse suposto ancestral dos catarrinos é o *Aegyptopithecus*, que viveu no Egito no final do período Oligoceno, há cerca de 28 milhões de anos. Entre 23 milhões e 14 milhões de anos atrás, uma linhagem provavelmente derivada do *Aegyptopithecus* teria originado, na África oriental, os ancestrais dos catarrinos atuais. O fóssil representativo dessa ancestralidade é o *Proconsul africanus*, pertencente a um grupo de fósseis denominados driopitecos. O mais antigo driopiteco teria surgido por volta de 20 milhões de anos atrás, e uma de suas linhagens teria originado o *Proconsul*. Supõe-se que esses macacos pesassem cerca de 20 kg, assemelhando-se, em tamanho, aos chimpanzés atuais, com encéfalo relativamente menor. Ocupavam desde hábitats de florestas densas até matas mais abertas, eventualmente realizando incursões ao solo.

Na classificação que adotamos neste livro, as principais famílias de catarrinos são **Cercopithecidae** (babuínos, mandris, bonobos, colobos etc., também chamados de macacos do Velho Mundo), **Hylobatidae** (gibões) e **Hominidae** (orangotangos, gorilas, chimpanzés e espécie humana). Os macacos destas duas últimas famílias não têm cauda e, devido a sua grande semelhança com os seres humanos, costumam ser chamados de **antropóides** (do grego *anthropus*, ser humano, acrescido do sufixo *oide*, semelhante. **(Fig. 12.7**, na página seguinte**)**.

▲ **Figura 12.7** • Representantes da subordem Anthropoidea (ordem Primates). Macacos platirrinos (infra-ordem Platyrrhini): sagüi (**A**); mico-leão-dourado (**B**); macaco-aranha (**C**). Macacos catarrinos: babuíno (família Cercopithecidae) (**D**); colobo (família Cercopithecidae) (**E**); gibão (família Hylobatidae) (**H**). O orangotango (**F**), o gorila (**G**) e o chimpanzé (**I**) pertencem à família Hominidae.

Na figura 12.8 apresentamos duas árvores filogenéticas dos primatas. A representada na parte superior concorda com a tabela 12.1. A filogenia representada mais abaixo, elaborada a partir de comparações moleculares entre os grupos, diverge da anterior quanto à relação de parentesco entre lêmures, lóris e társios, e apresenta também hipóteses sobre as relações de parentesco evolutivo entre grupos de mamíferos. **(Fig. 12.8)**

Tendências evolutivas entre os primatas

A vida nas árvores influenciou fortemente a evolução dos primatas. A principal vantagem desse modo de vida era estar a salvo dos carnívoros predadores que viviam no solo. A adaptação à vida arborícola, entretanto, exigiu que os primatas mudassem sua alimentação, que se tornou essencialmente herbívora, constituída de folhas, frutos e sementes, e desenvolvessem a capacidade de se agarrar e se locomover com segurança na copa das árvores. Acredita-se que o sucesso desses animais no ambiente arborícola permitiu-lhes aumentar suas chances de sobrevivência, prolongando assim a duração de seu ciclo de vida. Com isso, eles tiveram mais tempo para cuidar da prole e estabelecer os princípios da vida social, característica importante nos antropóides em geral e na espécie humana em particular.

▲ **Figura 12.8** • Acima, árvore filogenética dos primatas construída a partir de evidências fósseis e de anatomia comparada. Abaixo, árvore filogenética construída com base nas comparações de DNA e proteínas. Note a diferença em relação ao parentesco dos prossímios e tarsióides. (Modificado de Schmitz, Ohme, Suryobroto e Zischler, *Molecular Biology and Evolution* 19, 2002, p. 2.308-2.312)

Primeiro dedo oponível

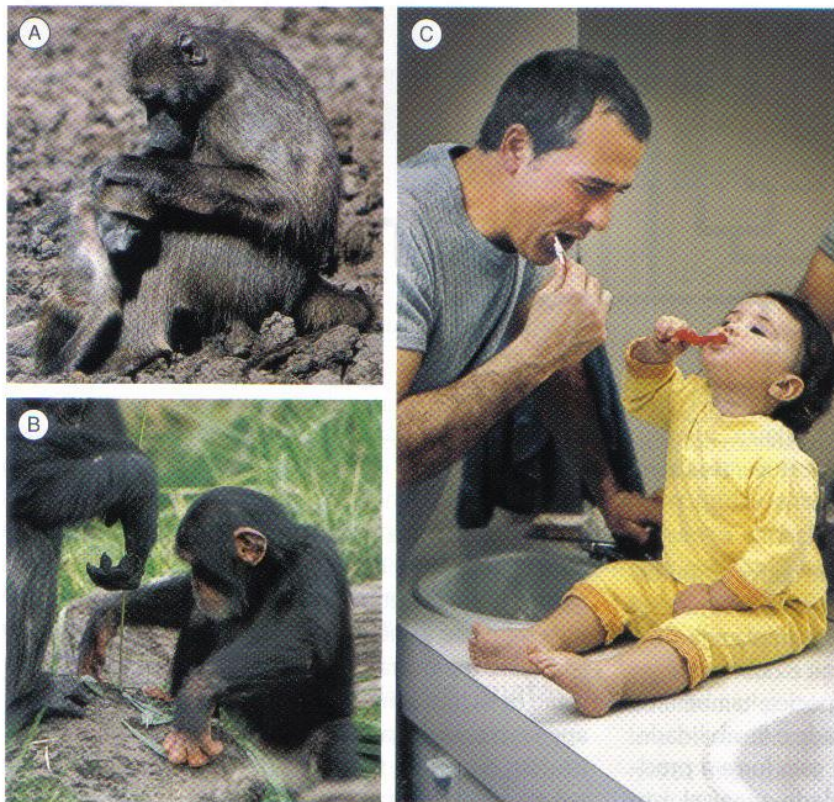
Os primatas desenvolveram, entre outros atributos, membros superiores extremamente ágeis e habilidosos. Além da cintura escapular, que permite ampla rotação e liberdade de movimentos dos ombros e dos braços, as mãos dos primatas (e, em certas espécies, também os pés) são dotadas de grande mobilidade e flexibilidade. Elas são capazes de agarrar objetos com força e precisão, graças à presença do **primeiro dedo oponível**, isto é, em posição que permite aproximar-se frontalmente de qualquer outro dedo, funcionando como pinça para agarrar. Essas características permitiram a nossos ancestrais saltar de galho em galho e explorar ativamente o ambiente à procura de alimento. Em certos platirrinos como os sagüis, a maioria dos dedos apresenta garras, e apenas o primeiro artelho do pé apresenta unha achatada. Nos catarrinos, todos os dedos são guarnecidos por unhas, em vez de garras. **(Fig. 12.9**, na página seguinte**)**.

▲ **Figura 12.9** • O polegar da mão humana e o dos chimpanzés são oponíveis, isto é, podem se opor a todos os outros dedos, permitindo pegar objetos com força e precisão.

Visão binocular ou estereoscópica

Outra importante adaptação dos primatas à vida nas árvores é a proximidade entre os olhos, situados na região frontal do crânio, ou seja, na face. Por estarem nessa posição, os dois olhos miram o mesmo objeto com pequena diferença de ângulo visual, o que permite ao cérebro calcular, por triangulação, a distância em que se encontra um objeto. Essa capacidade, denominada **visão binocular**, ou **estereoscópica**, foi de fundamental importância para a sobrevivência de nossos ancestrais no ambiente arborícola, onde um salto mal calculado podia ser fatal.

Vida familiar e cuidado com a prole

Acredita-se que a vida familiar desempenhou importante papel na evolução dos primatas. Estes são, entre os mamíferos, os que mais tempo dedicam aos cuidados da prole. A maioria dos primatas tem um único filhote por parto e cuida dele durante longo tempo. A espécie humana, em relação a todos os outros primatas, é a que alcança a maturidade mais tarde. Calcula-se que um ser humano leva cerca de 17 meses após o nascimento para atingir graus de mobilidade e independência equivalentes aos de um chimpanzé recém-nascido. Com isso, os jovens seres humanos dependem dos pais por muito tempo, durante o qual aprendem valores culturais básicos. Essa característica, aliada a um sistema nervoso bem desenvolvido, foi fundamental para a evolução cultural da humanidade. **(Fig. 12.10)**

◄ **Figura 12.10** • A vida social desempenha papel importante entre os primatas, tendo sido um dos fios condutores de sua evolução. **A.** Babuínos dedicam muitas horas do dia a atividades sociais, como limpar e alisar o pêlo de parentes e companheiros. **B.** Chimpanzés transmitem ensinamentos aos filhotes. **C.** Na espécie humana, o longo período de juventude e dependência em relação à família possibilita a transmissão cultural dos valores típicos de cada sociedade.

12.3 A ancestralidade humana

Estágio pré-humano: a vida nas árvores

Os mais recentes estudos atribuem muitas das características tipicamente humanas à adaptação de nossos ancestrais a ambientes arborícolas, em um estágio inicial de sua evolução. Ao estágio arborícola sucedeu-se a adaptação da linhagem primata ao ambiente de savana, inicialmente na orla das florestas e depois nas savanas abertas. Como vimos, a linhagem que originou antropóides e seres humanos evoluiu nas florestas tropicais africanas, vivendo e alimentando-se na copa das árvores, raramente descendo ao solo.

Evidências geológicas sugerem que, por volta de 8 milhões de anos atrás, ocorreram na África movimentos de placas tectônicas, que elevaram as terras planas e fizeram surgir cadeias de montanhas. Com isso, houve modificação drástica do clima no leste do continente africano, que se tornou mais quente e seco que no lado oeste. Enquanto na região oeste perduraram florestas exuberantes, onde viveram os ancestrais dos gorilas e chimpanzés, a região leste tornava-se progressivamente mais árida, com o aparecimento e a expansão de amplas áreas de **savana**, um tipo de campo com vegetação árborea, semelhante aos encontrados em certas regiões da África atual. Tudo indica que, nesses ambientes de transição entre florestas e savanas — as savanas arbóreas —, surgiram os ancestrais dos seres humanos.

Em 2003, o arqueólogo francês Michel Brunet encontrou, no Chade (África), restos de um crânio e dentes fossilizados de um primata classificado como *Sahelanthropus tchadensis*, considerado por alguns paleontólogos o mais antigo ancestral da linhagem humana. Esse organismo, segundo seu descobridor, poderia ter sido o ponto evolutivo em que nossa ancestralidade divergiu daquela que originou os chimpanzés. Datações radiométricas das rochas em que o *Sahelanthropus* foi encontrado permitem estimar sua idade entre 7 milhões e 6 milhões de anos. Os cientistas imaginam que o *Sahelanthropus* se parecia com um chimpanzé, mas com características mais "humanas", como a face menos projetada para a frente e a presença de caninos menores. Embora não existam informações a respeito, supõe-se que o *Sahelanthropus* seria um organismo ainda bem adaptado à vida arborícola, mas que possivelmente já fazia incursões ao solo.

Dois anos antes da descoberta do *Sahelanthropus*, em 2001, haviam sido encontrados fósseis de hominídeos antigos: o *Orrorin tugeniensis*, com idade estimada em torno de 6 milhões de anos, e o *Ardipithecus ramidus*, com idade estimada entre 5,8 milhões e 5,2 milhões de anos. Observe, na figura 12.11, a representação de uma hipótese que relaciona essas três espécies na ancestralidade humana. (**Fig. 12.11**, na página 275).

Estágio de adaptação à savana arbórea: australopitecos

O documentário fóssil mostra que, por volta de 4 milhões de anos atrás, surgiu na África o primeiro grupo de primatas considerados inequivocamente hominídeos, e os mais prováveis antecessores diretos do gênero humano: os **australopitecos** (gênero *Australopithecus*). Esses primatas adaptaram-se muito bem a um novo ambiente então em expansão no continente africano: as savanas arbóreas, campos que se desenvolviam na orla das florestas tropicais, as quais estavam em retração devido a mudanças climáticas.

O primeiro fóssil de australopiteco foi descoberto pelo paleontólogo Raymond Dart, em 1924, tendo sido classificado como *Australopithecus africanus*; de acordo com estimativas recentes, esse primata teria vivido entre 2,8 milhões e 2,3 milhões de anos atrás. Posteriormente foram encontrados diversos fósseis de australopitecos, classificados em diversas espécies; muitas delas teriam coexistido e eventualmente competido entre si, no período compreendido entre 4 milhão e 1 milhão de anos, e todas se extinguiram. Uma delas, porém, teria sido a ancestral do gênero *Homo*.

Uma das espécies mais conhecidas de australopiteco é *A. afarensis*, que viveu entre 3,9 milhões e 2,8 milhões de anos atrás. Em 1978, Donald Johanson e sua equipe, em um achado sensacional, desenterraram cerca de 250 fósseis dessa espécie na Etiópia. Um dos espécimes, cujo esqueleto estava mais completo, teria pertencido a uma fêmea com 1,30 m de altura que viveu há cerca de 3,2 milhões de anos; esse fóssil foi batizado de Lucy em alusão à canção dos Beatles *Lucy in the sky with diamonds*, que os paleontólogos ouviam em seu acampamento.

Entre as diversas espécies de australopiteco distingue-se um grupo denominado *grácil*, a que pertencem *A. africanus* e *A. afarensis*, e um grupo de australopitecos de ossatura mais encorpada, denominado *robusto* (*A. aethiopicus*, *A. robustus* e *A. boisei*). Observe, na tabela a seguir, algumas características comparativas entre duas espécies de australopiteco, *A. africanus* e *A. afarensis*. (**Tab. 12.2**, na página seguinte).

TABELA 12.2 • Comparação entre duas espécies de australopiteco

	A. afarensis	*A. africanus*
Altura	1 m a 1,5 m	1 m a 1,4 m
Peso	30 kg a 70 kg	30 kg a 60 kg
Características físicas gerais	Corpo leve e membros flexíveis, provavelmente semelhante a um chimpanzé.	Corpo leve e braços provavelmente longos, talvez com postura mais semelhante à humana.
Forma do crânio	Testa curta e oblíqua; face projetada para a frente; prega óssea sobre os olhos (supra-orbital) saliente.	Testa mais larga e alta; face mais curta; prega supra-orbital menos saliente.
Volume craniano	400 cm^3 a 500 cm^3	400 cm^3 a 500 cm^3
Dentição	Incisivos e caninos relativamente grandes, separados por um espaço; molares de tamanho moderado.	Caninos pequenos, quase do tamanho dos incisivos; sem espaço entre incisivos e caninos; molares maiores.
Dimorfismo sexual	Machos diferem das fêmeas mais marcadamente.	Machos diferem menos marcadamente das fêmeas.
Distribuição temporal	De 3,9 milhões a 2,8 milhões de anos atrás.	De 2,8 milhões a 2,3 milhões de anos atrás.
Distribuição geográfica	Leste da África.	Sul da África.

Também em 1978, na Tanzânia, a equipe chefiada por Mary Leakey descobriu um conjunto de pegadas fósseis de australopitecos extremamente bem preservadas, deixadas por três indivíduos que caminharam eretos sobre cinzas vulcânicas úmidas e fofas, há cerca de 3,6 milhões de anos.

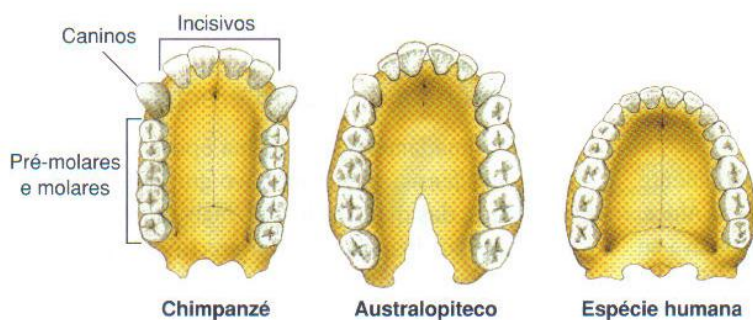
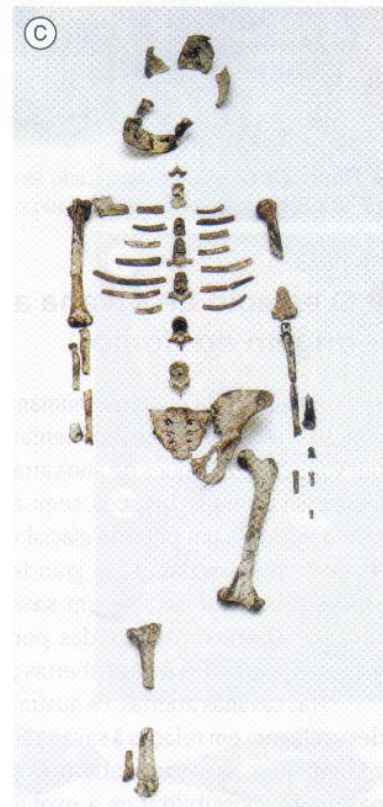
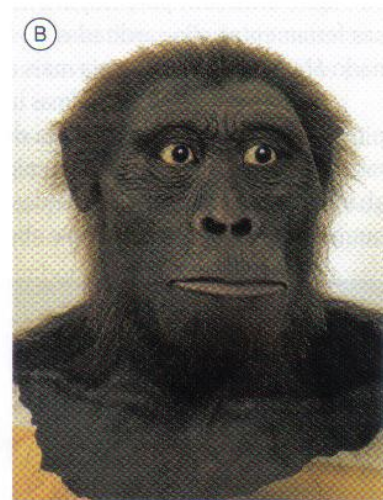
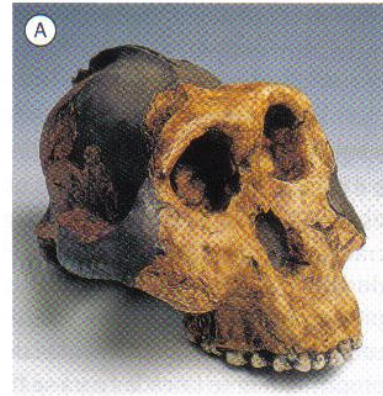
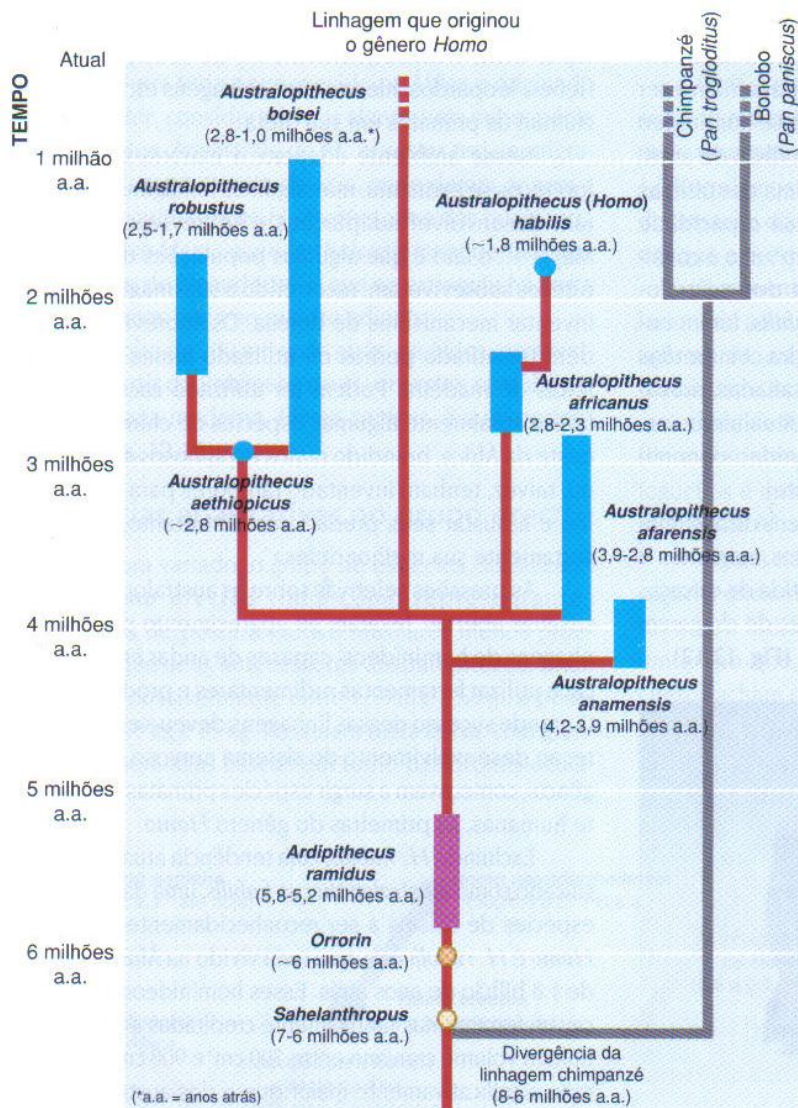
As pegadas confirmam o que é sugerido pela forma dos ossos da pélvis, das pernas e dos pés de restos fossilizados: *A. afarensis* era bípede, caminhando em posição ereta ou semi-ereta. Esses hominídeos mediam entre 1 m e 1,5 m de altura (os machos eram maiores que as fêmeas), tinham testa relativamente curta e oblíqua e maxilares proeminentes. Seu volume craniano, que reflete o tamanho do encéfalo, situava-se em torno de 400 cm^3 e 500 cm^3, pouco maior que a de um chimpanzé atual (cerca de 400 cm^3) e três vezes menor que a média dos seres humanos atuais (cerca de 1.350 cm^3). **(Fig. 12.11)**

Tendências adaptativas dos australopitecos

Os cientistas acreditam que os australopitecos constituíram um grupo de espécies muito bem-sucedido e diversificado, possivelmente distribuindo-se por grande parte da África, entre 4 milhões e 1 milhão de anos atrás. Como já dissemos, esses primatas evoluíram nas savanas arbóreas que se formavam junto à orla das florestas em retração.

Na savana, as árvores eram menores que as da floresta, e a distância entre elas era maior, impossibilitando a movimentação pela copa vegetal, como faziam provavelmente os ancestrais dos australopitecos na mata tropical. Atualmente acredita-se que diversas espécies de australopitecos eram capazes de andar eretas ou semi-eretas sobre os membros inferiores, o que se denomina **bipedalismo**. Apesar disso, esses primatas provavelmente ainda dependiam muito de suas adaptações ao ambiente arborícola para se proteger e se alimentar.

Chimpanzés e bonobos atuais são capazes de caminhar sobre duas pernas, mas o fazem sem flexionar os joelhos, dobrando o tronco para manter o equilíbrio. Seres humanos, por outro lado, andam com o corpo completamente ereto, dobrando os joelhos ao caminhar. A análise dos esqueletos de australopitecos sugere que eles não andavam de nenhuma dessas maneiras, mas talvez de modo semelhante ao "caminhar" dos orangotangos nas copas das árvores.

O grande desafio dos australopitecos era encontrar alimento na savana, bem mais árida que as florestas tropicais. Isso exigiu adaptações na dentição que permitissem mastigar alimentos vegetais duros, como sementes e raízes.

▲ **Figura 12.11** • À esquerda, acima, representação de uma hipótese de filogenia que relaciona possíveis ancestrais dos australopitecos (*Sahelanthropus*, *Orrorin* e *Ardipithecus ramidus*). Diversas espécies de australopitecos, todas extintas, viveram na África entre 4 milhões e 1 milhão de anos atrás. Acredita-se que uma das linhagens de australopitecos dessa época originou os ancestrais do gênero *Homo*. Abaixo, comparação entre as arcadas dentárias superiores de um chimpanzé, um australopiteco e um ser humano. **A.** Crânio fossilizado de *A. boisei*. **B.** Reconstrução da cabeça de um *A. afarensis*. **C.** Esqueleto fossilizado de Lucy, uma fêmea de *A. afarensis*.

Recentemente, alguns cientistas sugeriram que se incluíssem entre os australopitecos fósseis antigamente classificados como *Homo habilis*, que passariam a ser chamados de *Australopithecus habilis*. Esse hominídeo surgiu e viveu na África, há cerca de 1,8 milhão de anos, e é considerado por alguns estudiosos uma das últimas espécies de australopitecos a surgir. Sua capacidade craniana, estimada entre 450 cm³ e 600 cm³, não é considerada significativamente maior que a dos australopitecos. Fósseis de *H. habilis*, ou *A. habilis*, foram encontrados junto com ferramentas de pedra com bordas propositalmente lascadas para se tornar afiadas, provavelmente utilizadas para raspar e cortar. Atualmente essas ferramentas são creditadas ao hominídeo denominado *Homo rudolfensis* (veja mais adiante).

Acredita-se que estas últimas linhagens de australopitecos suplementavam sua dieta de frutos, sementes e raízes coletadas na savana com carniça obtida de carcaças abandonadas por leões e leopardos, antes de chegarem outros carniceiros, como hienas e abutres. **(Fig. 12.12)**

▲ **Figura 12.12** • Crânio fossilizado reconstruído (partes em azul) de *Homo habilis*, encontrado na Tanzânia, África.

O estágio de savana arbustiva: origem do *Homo*

A história da evolução humana foi profundamente marcada pelas mudanças ambientais ocorridas na África, por volta de 2,5 milhões de anos atrás. O clima tornava-se progressivamente mais seco, semi-árido, o que coincidia com o início de um período glacial no Hemisfério Norte. As florestas reduziam-se e grande parte das savanas arbóreas transformava-se em **savanas arbustivas**, ou **savanas abertas**, constituídas por árvores e arbustos menores, e grandes áreas cobertas por gramíneas.

Nas savanas abertas, os australopitecos ficavam em desvantagem em relação à savana arbórea, pois seu abrigo diminuíra. As savanas abertas, tendo vastas áreas de pastagens, possibilitaram a evolução de muitos tipos de mamíferos herbívoros (gnus, búfalos, girafas, antílopes etc.), e conseqüentemente de seus predadores (leões, leopardos, hienas, cães selvagens etc.). Estes incluíram os primatas em sua dieta.

Nesse ambiente adverso, a maioria dos australopitecos se extinguiu, mas algumas linhagens conseguiram desenvolver adaptações e sobreviver. Como diz Mayr, "... o fato é que algumas populações de australopitecos sobreviveram, recorrendo à sua imaginação para inventar mecanismos de defesa. Os sobreviventes podem ter atirado pedras ou utilizado armas primitivas, feitas de madeira. Podem ter utilizado cacetes, como fazem atualmente algumas espécies de chimpanzés do oeste da África, brandido ramos espinhosos como armas ou, talvez, tenham inventado tambores para fazer barulho e assustar seus predadores. Entretanto, o fogo foi certamente sua melhor defesa".

As pressões seletivas sobre os australopitecos, nas savanas abertas, levaram ao aparecimento de novas linhagens de hominídeos, capazes de andar eretos, fabricar e utilizar ferramentas rudimentares e produzir o fogo. O grande sucesso dessas linhagens deveu-se, certamente, ao desenvolvimento do sistema nervoso e da inteligência; começavam a surgir espécies primatas tipicamente humanas, as primeiras do gênero *Homo*.

Excluindo *H. habilis*, cuja tendência atual é ser classificado como *Australopithecus habilis*, uma das primeiras espécies de fósseis a ser reconhecidamente do gênero *Homo* é *H. rudolfensis*, que teria vivido na África por volta de 1,8 bilhão de anos atrás. Esses hominídeos, que fabricavam ferramentas (antigamente creditadas a *H. habilis*), tinham volume craniano entre 700 cm³ e 900 cm³, considerado significativamente maior que o dos australopitecos. Devido à sua origem, provavelmente a partir de antigas linhagens de australopitecos, há quem sugira considerar o próprio *H. rudolfensis* como australopiteco.

A emergência do *Homo erectus*

Aproximadamente na mesma época em que surgia *H. rudolfensis*, surgia um novo grupo de espécies hominídeas, das quais os fósseis mais representativos foram classificados como *Homo erectus*. Os primeiros fósseis desse hominídeo foram encontrados na Ilha de Java, em 1892, e na China, em 1927, ficando conhecidos, respectivamente, por "homem de Java" e "homem de Pequim". Tudo indica que, como todos os hominídeos que o antecederam, *H. erectus* surgiu na África e depois emigrou para a Ásia e para a Europa.

Acredita-se que havia não apenas uma, mas várias linhagens de *H. erectus*, daí alguns cientistas preferirem a denominação grupo *erectus*. Uma ou algumas delas teriam migrado para o leste e o sul da Ásia, há cerca de

1 milhão de anos, originando as linhagens asiáticas de *H. erectus*, que se extinguiram há aproximadamente 200 mil anos. Outra teria permanecido na África e originado o *H. ergaster*, considerado por alguns uma subespécie de *H. erectus*. Ancestrais do *H. ergaster* teriam migrado para a Europa e oeste da Ásia, onde deram origem a linhagens ocidentais de *H. erectus*, uma das quais teria evoluído para *Homo neanderthalensis* (neandertalenses ou "homens de Neandertal"), que se extinguiu há cerca de 27.000 anos (veja no quadro adiante).

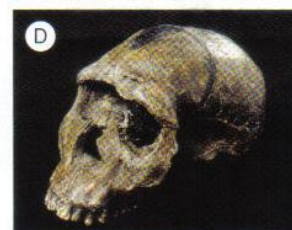
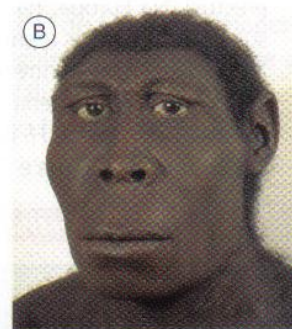
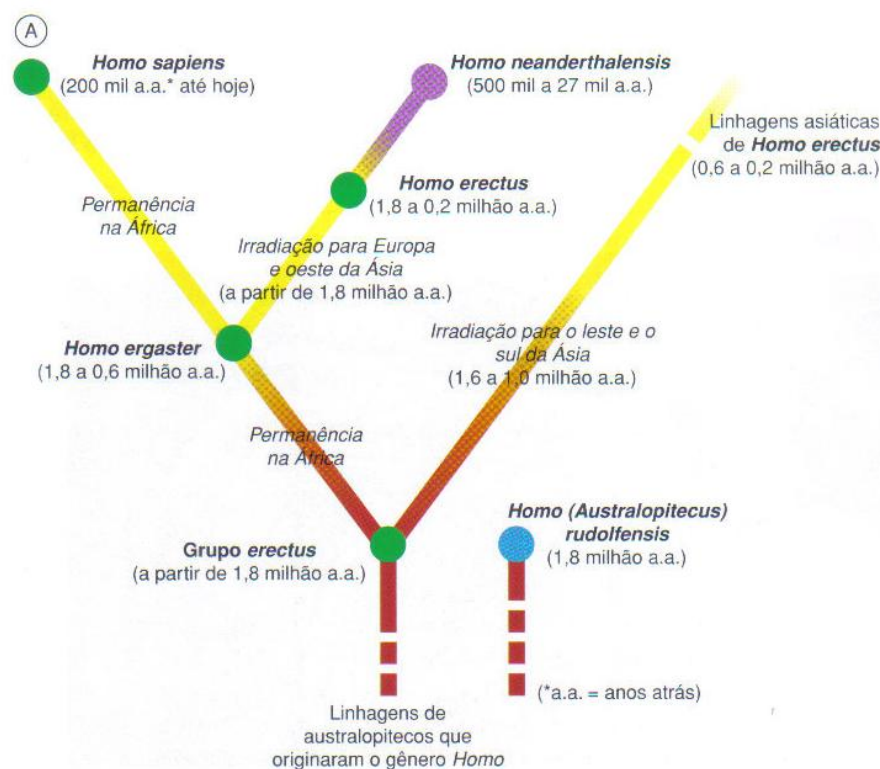
Por volta de 200 mil anos atrás, na África, possivelmente a partir de linhagens de *H. ergaster*, surgiu a espécie humana moderna, *Homo sapiens*, à qual pertencemos. **(Fig. 12.13)**

Tendências adaptativas no grupo *erectus*

Embora variado, o grupo de espécies classificado como *Homo erectus* tinha como representantes hominídeos de postura ereta e maxilares menos proeminentes que seus antecessores australopitecos. Eram mais altos, possivelmente entre 1,50 m e 1,60 m, e pesavam entre 55 kg e 85 kg. Possuíam testa baixa, com grandes protuberâncias ósseas em torno das órbitas oculares (pregas supra-orbitais), características que ainda revelavam claramente o parentesco com os símios.

Os fósseis mais antigos de *H. erectus* indicam que seu volume craniano era da ordem de 850 cm^3. Fósseis mais recentes apresentam volume craniano superior a 1.000 cm^3, mostrando que houve aumento significativo do tamanho do encéfalo do *H. erectus*, durante o período em que ele existiu.

O aumento expressivo do volume craniano está relacionado ao aumento do tamanho do cérebro e da inteligência. *H. erectus* era capaz de fabricar ferramentas relativamente avançadas, dotadas de cabo e com grande variedade de formatos e aplicações. Para se proteger do frio e dos inimigos, vestia-se com pele de animais, fazia fogueiras e morava em cavernas. Essas habilidades permitiram ao *H. erectus* explorar diferentes ambientes.

Alguns cientistas acreditam que *H. erectus* era um caçador eficiente, capaz de abater presas de grande porte, o que indicaria cooperação entre os indivíduos de um grupo que, posteriormente, repartiam o alimento. Outros acham que, embora inteligente, ele talvez fosse um coletor de alimento e comedor de carniça, aproveitando os restos de caça deixados por outros animais.

▲ **Figura 12.13** • **A.** Representação de uma das hipóteses que relaciona o *Homo erectus* ao *Homo sapiens*. **B.** Reconstrução da cabeça do *H. erectus*. **C.** Crânio do homem de Java. **D.** Crânio do *H. ergaster*. **E.** Ferramentas de pedra lascada atribuídas ao *H. erectus* primitivos.

QUADRO 12.1 • Os neandertalenses

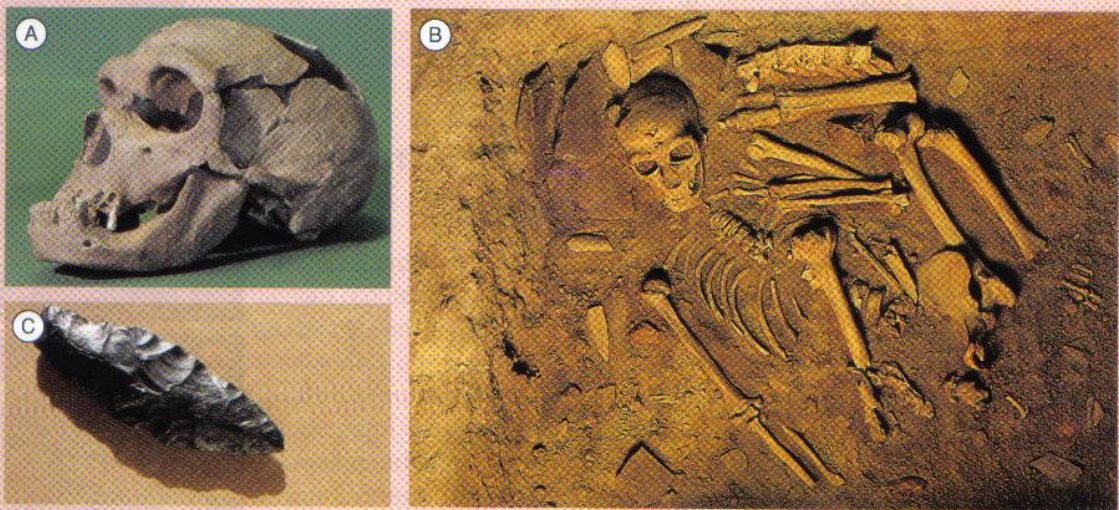
No período que vai de 200 mil a 27 mil anos atrás, viveram na Europa e no Oriente Médio os conhecidos "homens de Neandertal" ou **neandertalenses**, atualmente classificados como *Homo neanderthalensis*. Esqueletos fósseis de neandertalenses indicam que eles eram fortes e atarracados, tinham entre 1,55 m e 1,65 m de altura e pesavam entre 60 kg e 70 kg. Seu volume craniano — que em alguns fósseis atinge 1.600 cm^3 — é ligeiramente maior que o dos seres humanos modernos, mas sua testa (parte frontal do crânio) é oblíqua, e a maior parte do volume craniano estava concentrada na parte occipital. O rosto dos neandertalenses tinha feições rústicas, com pregas supra-orbitais proeminentes e maxilares salientes. As características físicas, como o corpo e os membros curtos e compactos, indicam adaptação ao clima frio da Europa, na época em que viveram. **(Fig. 12.14)**

Pesquisas recentes sugerem que as linhagens que originaram *H. neanderthalensis* e *H. sapiens* separaram-se há mais de 500 mil anos, possivelmente a partir de populações ancestrais de *H. ergaster* (do grupo *erectus*). Na Europa, há fósseis que documentam a sucessão de formas representadas por *H. erectus* até *H. heidelbergensis*, entre 500 mil e 200 mil anos atrás. Esta última espécie teria originado, por sua vez, populações arcaicas de *H. neanderthalensis*, que se expandiram pela Europa e Oriente Médio.

Os neandertalenses utilizavam ferramentas de pedra elaboradas, o que sugere que deviam ser bons caçadores, capazes de abater presas de grande tamanho. A descoberta de esqueletos fósseis de indivíduos idosos leva a crer que eles possuíam uma organização social suficientemente desenvolvida para permitir a sobrevivência até idades relativamente avançadas.

Há controvérsias sobre a existência ou não de uma "cultura neandertal". Os neandertalenses, ao menos ocasionalmente, enterravam os mortos, às vezes junto com armas, utensílios, comida e enfeites supostamente pertencentes ao morto. Isso indicaria, para alguns estudiosos, que eles desenvolveram rituais fúnebres, quem sabe relacionados à crença em vida depois da morte. Outros pesquisadores questionam essa interpretação, argumentando que os neandertalenses não possuíam os "bens de sepultura" que atestariam a crença na vida após a morte.

O desaparecimento relativamente súbito dos neandertalenses na Europa, entre 30 mil e 27 mil anos atrás, é atribuído à chegada de populações de *H. sapiens* provenientes da África (via oeste da Ásia), entre 40 mil e 35 mil anos atrás. Estes, muito mais avançados culturalmente que os neandertalenses, colonizaram a Europa e o Oriente Médio, competindo com eles e possivelmente levando-os à extinção. ■

Homo neanderthalensis

▲ **Figura 12.14** • Os neandertalenses são atualmente classificados na espécie *Homo neanderthalensis*. Essa espécie teria divergido das linhagens que originaram *H. sapiens* há cerca de 500 mil anos ou mais. **A.** Crânio fossilizado de *H. neanderthalensis*, encontrado na França. **B.** Restos do esqueleto de *H. neanderthalensis*, com idade estimada em 45.000 anos. **C.** Ferramenta de pedra lascada atribuída ao *H. neanderthalensis*.

12.4 A espécie humana moderna: *Homo sapiens*

O grupo de espécies do *Homo erectus* dominou o mundo entre 1,8 milhões e 200 mil anos atrás, quando se extinguiu. De acordo com a hipótese mais aceita atualmente, a espécie humana moderna, *Homo sapiens*, surgiu na África, entre 200 mil e 150 mil anos atrás, a partir de linhagens de *H. ergaster*. Daí teria irradiado para fora da África e colonizado os outros continentes (hipótese da "origem única na África"). Outra hipótese, que tem perdido força nos últimos anos, é que a espécie humana atual teria surgido simultaneamente na África, Ásia e Europa, a partir de populações de *H. erectus* que habitavam esses locais (hipótese da "origem multirregional").

Acredita-se que entre 100 mil e 70 mil anos atrás, a espécie humana moderna irradiou da África para a Ásia, de onde atingiu o continente australiano, entre 60 mil e 50 mil anos atrás, e a Europa, há cerca de 40 mil anos. Entre 14 mil e 11 mil anos atrás, grupos humanos vindos da Ásia atravessaram o Estreito de Bering e chegaram ao continente americano. Segundo alguns estudiosos, a passagem pelo Estreito de Bering poderia ter ocorrido por volta de 40 mil anos, mas os indícios apresentados são cientificamente frágeis. **(Fig. 12.15)**

Evolução e cultura

Podemos iniciar um sumário da evolução humana pela passagem da vida semi-arborícola dos australopitecos para a adaptação à vida no solo, bípede, dos diferentes grupos de *H. erectus*. Isso exigiu mudanças significativas no esqueleto e na dentição. A vida nas savanas abertas trouxe grandes desafios aos ancestrais da espécie humana, e também propiciou grandes soluções; por um lado, se no ambiente aberto havia menos segurança que nas árvores, isso era compensado pela maior liberdade de locomoção e de exploração dos ambientes. As mãos, liberadas da tarefa de se agarrar ou de caminhar, puderam exercitar suas habilidades, e a manufatura de objetos desenvolveu-se, dando início às primeiras formas de tecnologia, uma das marcas registradas da evolução hominídea. Simultaneamente, o desenvolvimento da comunicação e da fala também devem ter sido importantes para a sobrevivência dos primeiros grupos humanos nas savanas.

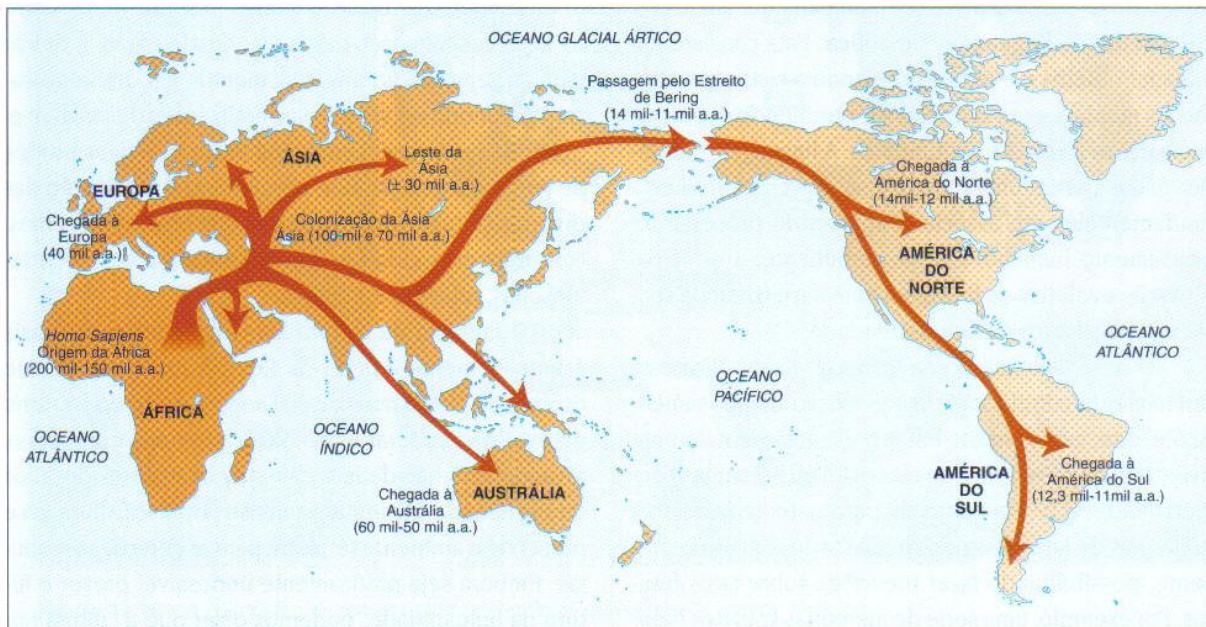
Um grande avanço na passagem evolutiva de australopiteco para *H. sapiens* é o **desenvolvimento do sistema nervoso** e, conseqüentemente, da inteligência. Em linhas gerais, isso é evidenciado pelo aumento do volume craniano na linhagem humana, dos 450 cm^3 dos australopitecos até os 1.350 cm^3 de *H. sapiens* moderno. Observe, na tabela a seguir, comparações entre a massa corporal e massa encefálica de alguns animais relacionados à história evolutiva humana. **(Tab. 12.3)**

▲ **Figura 12.15** • Segundo a hipótese mais aceita atualmente, a espécie humana moderna (*Homo sapiens*) surgiu na África, possivelmente a partir de *H. ergaster*, e depois se irradiou para as diversas partes do mundo.

TABELA 12.3 • Comparação entre a massa corporal e a massa encefálica de alguns primatas

Organismo	Massa corporal (kg)	Massa encefálica (g)	Relação mc/me
Cercopiteco (macaco do Velho Mundo)	4,24	66	64,2
Gorila	126,5	506	250
Chimpanzé	36,4	410	88,7
Australopithecus afarensis	50,6	415	123,4
Homo rudolfensis	55	800	68,7
Homo erectus	58,6	826	70,9
Homo sapiens	44,0	1.250	35,2

Dados baseados em Mayr, *What evolution is*, 2002.

O sistema nervoso humano é constituído por nada menos de 30 bilhões de células nervosas. Destas, cerca de 10 bilhões situam-se na parte mais desenvolvida do encéfalo — o córtex cerebral —, responsável por atividades mentais tipicamente humanas, como o pensamento e as emoções. Apesar de sabermos que os neurônios do córtex estabelecem trilhões de conexões elétricas e químicas, ainda não compreendemos como toda essa atividade se transforma em consciência e pensamento.

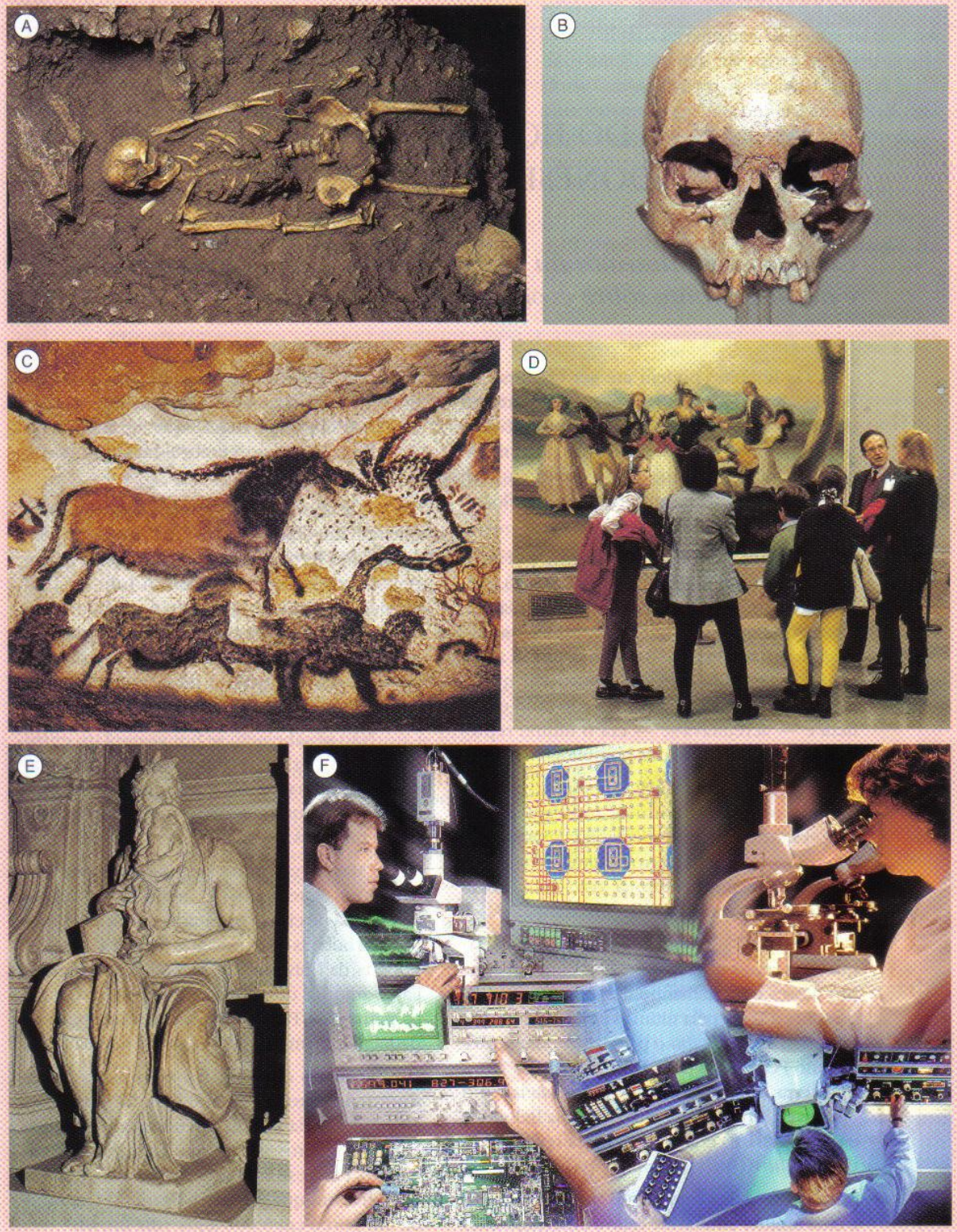
Na linhagem evolutiva hominídea, o desenvolvimento do encéfalo ocorreu simultaneamente ao desenvolvimento da **linguagem simbólica**. Esta consiste em associar objetos e eventos do mundo a suas representações mentais — os símbolos —, permitindo expressar idéias, experiências e sentimentos. A linguagem simbólica não é apenas uma forma de se expressar, mas está fundamentalmente associada ao próprio processo de pensamento humano. Ela foi, certamente, a principal inovação evolutiva da linhagem humana e continua sendo uma das fontes de sua criatividade.

O desenvolvimento da linguagem simbólica está intimamente correlacionado à evolução do pensamento abstrato; este consiste em representar mentalmente eventos e objetos, sem que eles estejam presentes concretamente. O pensamento abstrato permite relacionar memórias de fatos ocorridos no passado com os do presente, possibilitando fazer previsões sobre fatos futuros. Por exemplo, uma série de memórias sobre os hábitos de um animal permite prever como ele poderá reagir em certa situação hipotética. Essa dimensão histórica que o ser humano tem de si mesmo, fundamental para a evolução de nossa cultura, ao que tudo indica, não está presente em nenhuma outra espécie da Terra.

Pode-se definir **cultura** como o conjunto de conhecimentos e experiências acumulados pelas populações humanas e transmitidos ao longo das gerações. A cultura também é um processo pelo qual cada pessoa, individualmente, e a humanidade como um todo, extraem e acumulam conhecimentos a partir das experiências vividas e da reflexão sobre elas.

Talvez o salto mais prodigioso da humanidade rumo ao conhecimento tenha sido o desenvolvimento da escrita, que ocorreu há não mais de 10 mil anos. As gerações humanas passaram, desde então, a deixar para as gerações futuras documentos em que registravam seu modo de vida e suas realizações. Foi a incrível quantidade de conhecimentos escritos e transmitidos de geração a geração que possibilitou a construção das diversas culturas e da civilização que hoje conhecemos, com inúmeras cidades, monumentos, obras de arte, filosofias, religiões e ciências.

O impacto da cultura humana se fez sentir mais acentuadamente a partir da Revolução Industrial, que ocorreu há pouco mais de 200 anos. A partir daí, o ritmo de evolução cultural e tecnológica tornou-se frenético, levando a humanidade a enfrentar os maiores desafios da sua história: alimentar a imensa população humana e preservar o ambiente terrestre para as gerações vindouras. Embora seja praticamente impossível prever o futuro da humanidade, podemos dizer que a cultura humana dispõe de potencial para resolver seus problemas e para continuar sua história evolutiva no planeta, quem sabe, por muito tempo. **(Fig. 12.16)**

Homo sapiens

▲ **Figura 12.16** • A cultura e a tecnologia são características específicas da espécie humana moderna. **A.** Esqueleto fossilizado do homem de Cro-Magnon encontrado na Itália com idade estimada em 12.000 anos. **B.** Crânio de Luzia, considerado o fóssil humano mais antigo da América do Sul. **C.** Pinturas rupestres da caverna de Lascaux, na França. **D.** Museu do Prado, Madri. **E.** Escultura de Michelangelo, representando Moisés. **F.** Exemplos de tecnologia contemporânea.

LEITURA

PRIMO ANÃO DO HOMEM HABITOU INDONÉSIA

Criatura desenterrada na Ilha das Flores tinha 1 metro de altura e acende debate sobre evolução da inteligência

Os hobbits[1] podem até ser criaturas de ficção. Mas uma raça de pessoas de um metro de altura conviveu em tempos passados com o homem moderno. Trata-se do mais novo membro do gênero humano, cujos fósseis foram desenterrados numa caverna na Ilha de Flores, Indonésia.

Batizada de *Homo floresiensis* por seus descobridores, a nova espécie está sendo considerada um dos maiores achados da paleoantropologia nas últimas décadas. Ela se extinguiu provavelmente há apenas 12 mil anos, no final da Idade do Gelo, época em que o *Homo sapiens* já havia colonizado todo o planeta e — acreditava-se — era o último representante da linhagem dos hominídeos.

Os fósseis, um esqueleto completo e partes de seis outros indivíduos, indicam que o *H. floresiensis* era uma espécie anã, cujos adultos não passavam de um metro de altura. Seu crânio abrigava o menor cérebro já visto entre hominídeos — do tamanho do de um chimpanzé.

"Foi uma surpresa imensa, porque tudo o que estudamos dizia que pessoas com um cérebro desses e um tamanho desses haviam andado sobre a Terra pela última vez há 3,5 milhões de anos", disse à *Folha* o paleoantropólogo australiano Peter Brown, da Universidade da Nova Inglaterra, que descobriu o *H. floresiensis* e o descreveu, juntamente com colegas da Indonésia e da Austrália, na edição de hoje da revista científica *Nature* (www.nature.com).

O esqueleto tem 18 mil anos e pertencia a uma mulher adulta. Ele estava enterrado com restos de estegodonte (elefante-anão), de dragões-de-komodo e várias ferramentas de pedra. Esse contexto sugere que, ao menos no que diz respeito ao cérebro, tamanho não é documento.

"Ele abre um debate sobre cognição, porque tem um cérebro menor que o nosso e está lá, fazendo ferramentas de pedra", diz a antropóloga brasileira Marta Mirazón Lahr, da Universidade de Cambridge (Reino Unido), que comentou a descoberta na *Nature*. "A questão é: o que causa a cognição? É o grau de encefalização [tamanho] ou o número de conexões que o cérebro faz?"

Não se sabe nem se houve contato entre o *H. floresiensis* e o homem moderno. Datações preliminares dos outros indivíduos do sítio indicam que a espécie já estava presente há 95 mil anos.

"Mas a evidência direta de humanos modernos em Flores tem só 11 mil anos, logo depois da camada de cinzas vulcânicas que selou o destino dos hobbits e dos elefantes-pigmeus", diz Bert Roberts, da Universidade de Wollongong, Austrália, co-autor da descoberta. Há, no entanto, entre os nativos de Flores uma lenda sobre pessoas pequenas, chamadas "ebu gogo" no idioma local.

Segundo os cientistas, o nanismo do *H. floresiensis* provavelmente foi uma adaptação ao ambiente da ilha. Esse fenômeno é comum entre mamíferos ilhéus, que reduzem seu tamanho em resposta à escassez de comida. "Há ilhas em que elefantes ficam do tamanho de um porco em 5.000 anos", diz Brown.

[1] Termo utilizado por analogia aos personagens do livro *O senhor dos anéis*, de J.R.R. Tolkien, que eram semelhantes a seres humanos, com pequena estatura.

O nanismo acontece em seres humanos, mas como um problema genético. Nesse caso, o tamanho do corpo diminui, mas o do cérebro não. Por isso, os cientistas sabem que o hobbit indonésio é uma espécie encolhida.

A nova espécie seria uma versão "light" do *Homo erectus*, considerado o ancestral direto da espécie humana. O *H. erectus* foi o primeiro hominídeo a atingir a Indonésia, provavelmente de barco.

"Temos ferramentas de pedra de 840 mil anos em Flores, mas não sabemos quem as produziu", disse Brown. A hipótese preferida do antropólogo é que uma população de *H. erectus* tenha chegado à ilha e encolhido com o tempo.

- **Fonte:** Cláudio Angelo (editor de Ciência), *Folha de S.Paulo*, 28 out. 2004.

Descoberta reafirma teoria da evolução

Na última década, sete ou oito novas espécies de hominídeo foram descritas, o que levou à reforma da árvore genealógica da humanidade e ao reconhecimento da variabilidade de nichos ecológicos ocupados por hominídeos.

Hoje, são reconhecidas até 20 espécies de hominídeos; muitas existiram concomitantemente, levando ao abandono da noção de uma seqüência evolutiva linear em direção ao homem moderno. Também aceita-se que o *H. sapiens* evoluiu na África recentemente (nos últimos 250 mil anos), de onde se dispersou para o mundo, transformando-se na única espécie de hominídeo existente.

Os fósseis descobertos na Ilha de Flores representam mais do que uma adição a esse registro fantástico da evolução da nossa família. As criaturas, interpretadas como descendentes do *Homo erectus* da Ilha de Java, que, isoladas na pequena ilha, viraram pigméias, demonstram que os hominídeos obedeceram às mesmas regras evolutivas que os outros animais.

Os fósseis, que receberam o nome de *Homo floresiensis*, levantam inúmeras questões: qual era o seu padrão de crescimento? Por que o processo alométrico que o levou a reduzir o tamanho em 30% provocou uma redução do cérebro de mais de 50%?

Como pensava uma criatura com cérebro menor do que "Lucy" — o célebre *Australopithecus afarensis* de 3,5 milhões de anos —, mas que sabia manufaturar ferramentas e caçar elefantes (pigmeus estes também)?

Podemos ainda nos perguntar se essas criaturas se encontraram frente a frente com caçadores humanos e se estes tiveram um papel na sua extinção. O *Homo floresiensis* é, sem dúvida, uma das descobertas paleoantropológicas mais fantásticas.

Marta Mirazón Lahr, diretora do Laboratório Duckworth no Centro Leverhulme de Estudos Evolutivos Humanos da Universidade de Cambridge, Reino Unido.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

12.1 Nosso parentesco com os animais

1. O que dizem atualmente os evolucionistas sobre nossa relação evolutiva com macacos antropóides, como o chimpanzé e o gorila?

2. Quais são as principais evidências levadas em conta para estudar a história evolutiva humana, em particular?

12.2 A classificação da espécie humana

3. Apresente a classificação da espécie humana quanto às seguintes categorias taxonômicas: Filo – Classe – Ordem – Subordem – Infra-ordem – Superfamília – Família – Subfamília – Gênero – Espécie.

4. Quando teriam vivido os ancestrais dos primatas?

5. Como e quando se supõe que tenham surgido os macacos do Novo Mundo (platirrinos)? Caracterize e exemplifique esse grupo de primatas.

6. Como e quando se supõe que tenham surgido os macacos catarrinos? Caracterize e exemplifique esse grupo de primatas.

7. Comente como cada uma das seguintes características desenvolvidas pelos ancestrais dos primatas influenciou nossa evolução: a) primeiro dedo oponível; b) visão binocular (estereoscópica); c) vida familiar e cuidado com a prole.

12.3 A ancestralidade humana

8. Em que tipo de ambiente teria evoluído a linhagem humana e como isso influenciou sua adaptação?

9. Quando e onde viveram os australopitecos, nossos prováveis ancestrais?

10. Como eram os australopitecos?

11. Comente as características dos australopitecos que contribuíram para sua adaptação ao ambiente de savana arbórea, então em expansão na África?

12. Como se supõe que a adaptação às savanas abertas tenha influenciado a evolução das linhagens ancestrais de hominídeos?

13. Quando e como surgiu o grupo de espécies do *Homo erectus* e qual sua relação com a história evolutiva de nossa espécie?

14. Como eram os *Homo erectus*?

Quadro 12.1 Os neandertalenses

15. Como eram e onde viveram os neandertalenses?

16. Por que se supõe que os neandertalenses tenham se extinguido com relativa rapidez?

12.4 A espécie humana moderna: *Homo sapiens*

17. Como e onde se supõe que tenha surgido a espécie humana moderna?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões 18 e 19.

a) Antropóides.
b) Hominídeos.
c) Neandertalenses.
d) Primatas.

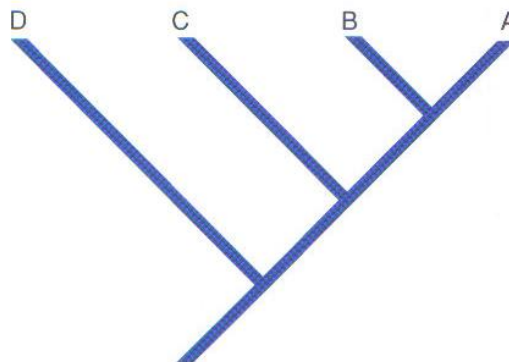
18. Como se denomina o grupo que reúne prossímios, macacos e seres humanos?

19. Que grupo reúne seres humanos e seus ancestrais fósseis?

20. O nome científico dos seres humanos modernos é
a) *Australopithecus afarensis*.
b) *Homo erectus*.
c) *Homo habilis*.
d) *Homo sapiens*.

21. Os macacos evolutivamente mais aparentados com os seres humanos, reunidos na família Hominidae, são
a) babuínos, bugios e orangotangos.
b) bugios, chimpanzés e gorilas.
c) chimpanzés, gorilas e orangotangos.
d) sagüis, bugios e micos-leões-dourados.

22. Os macacos que apresentam maior semelhança genética com os seres humanos são os
a) babuínos.
b) chimpanzés.
c) gorilas.
d) orangotangos.

23. Na árvore filogenética a seguir, em que A representa seres humanos, B, C e D representam, respectivamente,

a) chimpanzés, gorilas e orangotangos.
b) chimpanzés, orangotangos e gorilas.
c) gorilas, chimpanzés e orangotangos.
d) gorilas, orangotangos e chimpanzés.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 24 a 26.

a) 150 mil anos.
b) 2 milhões de anos.
c) 8 milhões de anos.
d) 30 milhões de anos.

24. Há aproximadamente quantos anos viveu o ancestral comum a seres humanos e chimpanzés?

25. A espécie humana moderna surgiu há aproximadamente quantos anos?

26. O ancestral comum dos macacos viveu há aproximadamente quantos anos?

QUESTÃO DISCURSIVA

27. Considere a possibilidade de realizar uma pesquisa, por conta própria ou com um grupo de colegas, sobre o que as pessoas pensam a respeito da origem da espécie humana. Entreviste pessoas de diversas formações e que exercem atividades diversas, como médicos, padres, empregadas domésticas, engenheiros etc. Elabore as perguntas com antecedência, abordando temas tais como: se a pessoa conhece a teoria da evolução; se ela tem alguma hipótese sobre a origem da espécie humana; se ela tem idéia de há quanto tempo surgiu a espécie humana etc.
Ao entrevistar cada pessoa lembre-se de perguntar seu grau de escolaridade, profissão, religião e idade. Organize os dados da entrevista em uma tabela e discuta-os com seus colegas.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

28. (Enem-MEC) "Os progressos da medicina condicionaram a sobrevivência de número cada vez maior de indivíduos com constituições genéticas que só permitem o bem-estar quando seus efeitos são devidamente controlados através de drogas ou procedimentos terapêuticos. São exemplos os diabéticos e os hemofílicos, que só sobrevivem e levam vida relativamente normal ao receberem suplementação de insulina ou do fator VIII da coagulação sangüínea."

SALZANO, M. Francisco. "Ciência Hoje": SBPC: 21(125),1996.

Essas afirmações apontam para aspectos importantes que podem ser relacionados à evolução humana.
Pode-se afirmar que, nos termos do texto,

a) os avanços da medicina minimizam os efeitos da seleção natural sobre as populações.
b) os usos da insulina e do fator VIII da coagulação sangüínea funcionam como agentes modificadores do genoma humano.
c) as drogas medicamentosas impedem a transferência do material genético defeituoso ao longo das gerações.
d) os procedimentos terapêuticos normalizam o genótipo dos hemofílicos e diabéticos.
e) as intervenções realizadas pela medicina interrompem a evolução biológica do ser humano.

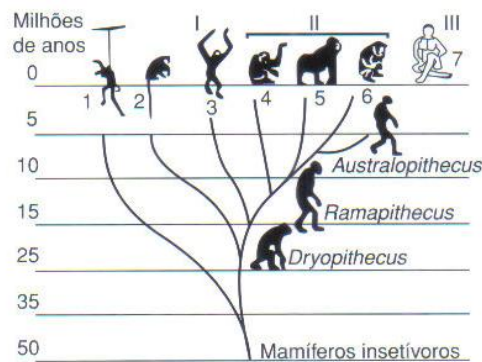
29. (Fuvest) Pesquisadores descobriram na Etiópia fósseis que parecem ser do mais antigo ancestral da humanidade. Como a idade desses fósseis foi estimada entre 5,2 milhões e 5,8 milhões de anos, pode-se dizer que esses nossos ancestrais viveram

a) em época anterior ao aparecimento dos anfíbios e dos dinossauros.
b) na mesma época que os dinossauros e antes do aparecimento dos anfíbios.
c) na mesma época que os dinossauros e após o aparecimento dos anfíbios.
d) em época posterior ao desaparecimento dos dinossauros, mas antes do surgimento dos anfíbios.
e) em época posterior ao surgimento dos anfíbios e ao desaparecimento dos dinossauros.

30. (PUC-Minas) Recentes análises do DNA de chimpanzés permitiram concluir que o homem é mais aparentado com eles do que com qualquer outro primata. Isso permite concluir que

a) o chimpanzé é ancestral do homem.
b) o chimpanzé e o homem têm um ancestral comum.
c) o homem e o chimpanzé são ancestrais dos gorilas.
d) a evolução do homem não foi gradual.
e) os chimpanzés são tão inteligentes quanto o homem.

31. (Enem-MEC) O assunto na aula de Biologia era a evolução do Homem. Foi apresentada aos alunos uma árvore filogenética, igual à mostrada na ilustração, que relacionava primatas atuais e seus ancestrais.
Se fosse possível a uma máquina do tempo percorrer a evolução dos primatas em sentido contrário, aproximandamente quantos milhões de anos precisaríamos retroceder, de acordo com a árvore filogenética apresentada, para encontrar o ancestral comum do homem e dos macacos antropóides (gibão, orangotango, gorila e chimpanzé)?

a) 5
b) 10
c) 15
d) 30
e) 60

"Árvore filogenética provável dos antropóides"

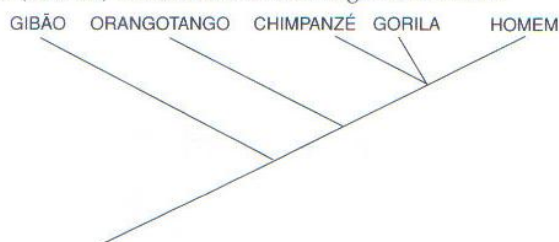
Legenda da ilustração:

1 - Símios do Novo Mundo	I - Hilobatídeos
2 - Símios do Velho Mundo	II - Pongídeos
3 - Gibão	III - Hominídeos
4 - Orangotango	
5 - Gorila	
6 - Chimpanzé	
7 - Homem	

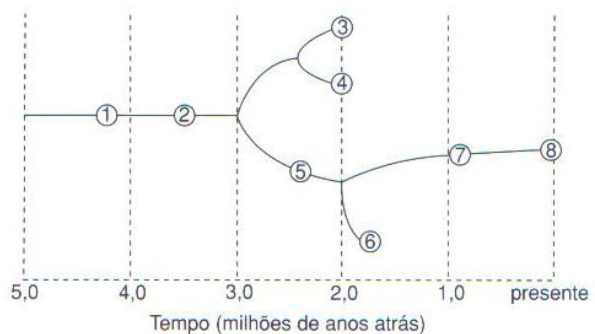
Para responder às questões 32 e 33 utilize as informações da questão 31.

32. (Enem-MEC) Foram feitas comparações entre DNA e proteínas da espécie humana com DNA e proteínas de diversos primatas. Observando a árvore filogenética, você espera que os dados bioquímicos tenham apontado, entre os primatas atuais, como nosso parente mais próximo o
a) *Australopithecus*.
b) Chimpanzé.
c) *Ramapithecus*.
d) Gorila.
e) Orangotango.

33. (Enem-MEC) Com o material fornecido pelo professor, os alunos emitiram várias opiniões, a saber:
I. os macacos antropóides (orangotango, gorila e chimpanzé e gibão) surgiram na Terra mais ou menos contemporaneamente ao Homem;
II. alguns homens primitivos, hoje extintos, descendem dos macacos antropóides;
III. na história evolutiva, os homens e os macacos antropóides tiveram um ancestral comum;
IV. não existe relação de parentesco genético entre macacos antropóides e homens.
Analisando a árvore filogenética, você pode concluir que
a) todas as afirmativas estão corretas.
b) apenas as afirmativas I e III estão corretas.
c) apenas as afirmativas II e IV estão corretas.
d) apenas a afirmativa II está correta.
e) apenas a afirmativa IV está correta.

34. (UFS-SE) Considere a árvore filogenética abaixo

Dos macacos antropóides representados no esquema, os que apresentam maior parentesco com o homem são o
a) chimpanzé e o orangotango.
b) orangotango e o gorila.
c) gorila e o chimpanzé.
d) gibão e o chimpanzé.
e) gorila e o gibão.

35. (PUC-RS) Instrução: Responder à questão com base nas informações e representação abaixo.
Registros, econtrados na África, de ossadas fósseis de *Australopithecus* (do latim *autralos* = do sul + *phitecus* = macaco) são evidências de que o homem teve sua origem evolutiva nesse continente. A teoria da origem africana propõe que o ser humano moderno (*Homo sapiens*) surgiu há cerca de 130 mil anos na África e dispersou-se por outros continentes há cerca de 100-60 mil anos.

Árvore filogenética da linhagem do homem moderno

(1) *Australopithecus anamensis*
(2) *Australopithecus afarensis*
(3) *Australopithecus boisei*
(4) *Australopithecus robustus*
(5) *Australopithecus garhi*
(6) *Homo habilis*
(7) ______________
(8) *Homo sapiens*

Evidências científicas indicam atualmente a árvore filogenética da linhagem do homem moderno conforme a representação acima, na qual o número 7 corresponde à espécie.
a) *Homo neanderthalensis*.
b) *Australopithecus habilis*.
c) *Australopithecus erectus*.
d) *Australopithecus sapiens*.
e) *Homo erectus*.

▼ Louva-a-deus capturando borboleta

PARTE III
ECOLOGIA

CAPÍTULO

13 FUNDAMENTOS DA ECOLOGIA

▶ Parte da superfície do planeta Terra fotografada do espaço.

13.1 Conceitos básicos em Ecologia

O que é Ecologia?

O termo **Ecologia** (do grego *oikos*, casa, e *logos*, ciência), originalmente empregado em 1866 pelo zoólogo alemão Ernst Haeckel (1834-1919), designa o estudo das relações entre os seres vivos e o ambiente em que vivem. Trata-se de uma ciência multidisciplinar, que engloba diversos ramos do conhecimento. Além da Biologia, da Física e da Química, também as ciências econômicas e sociais têm de ser integradas para que se possa entender a complexidade das relações entre a humanidade, os outros seres vivos e o planeta.

Felizmente, nas últimas décadas, a humanidade parece ter despertado para os problemas ambientais causados pela expansão da população humana. Estamos tomando consciência de que é preciso fazer algo para evitar a degradação do ambiente favorável à vida em nosso planeta. Nesse contexto, os conhecimentos ecológicos são fundamentais para tentarmos reverter alguns dos graves problemas ambientais que nós mesmos provocamos. A primeira atitude para proteger o ambiente é procurar compreender a intrincada rede que interliga os seres vivos e o meio. Você estará dando um passo nesse sentido ao estudar este e os próximos capítulos, referentes à Ecologia. **(Fig. 13.1)**

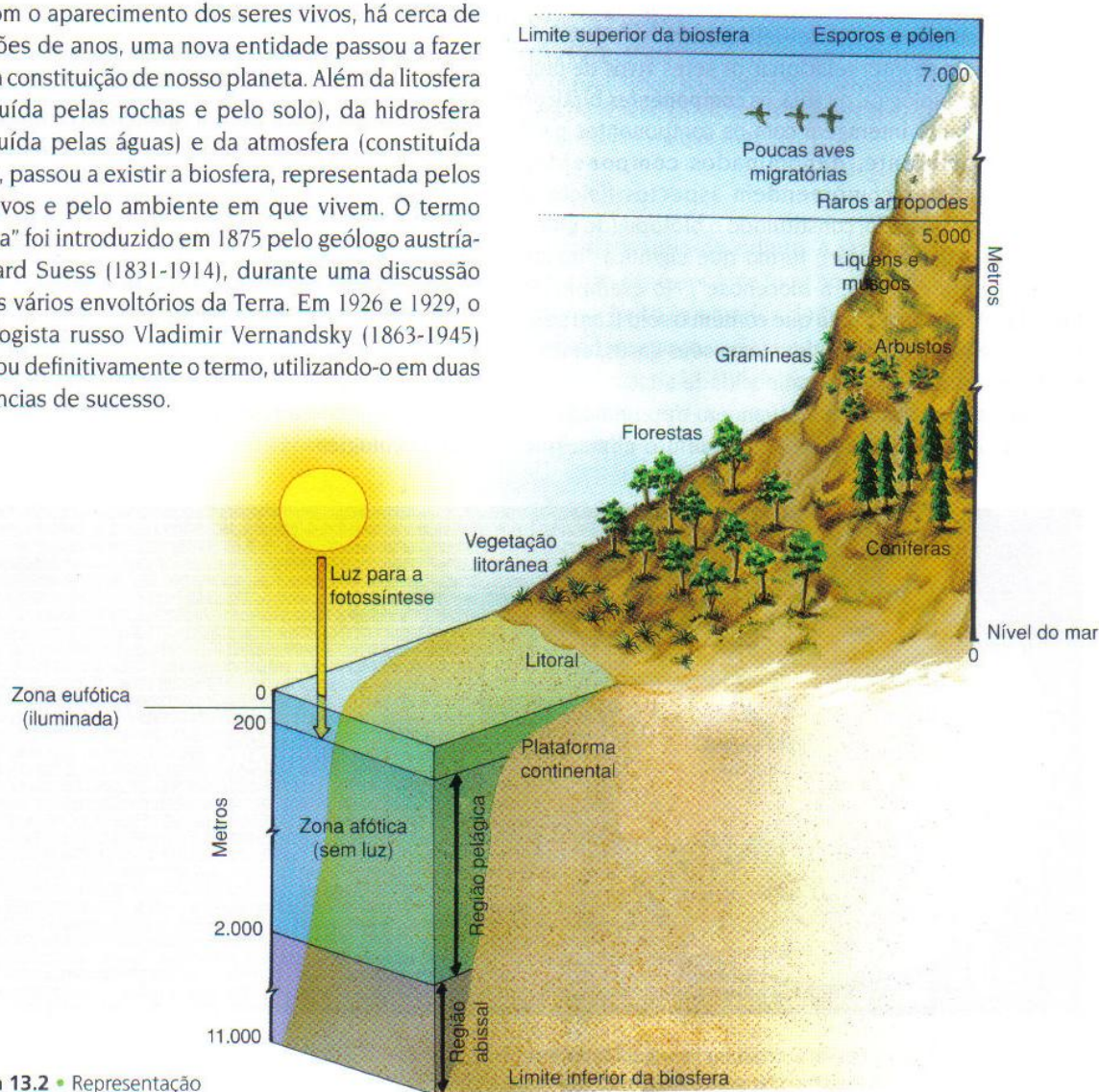
▲ **Figura 13.1** • Nas últimas décadas desenvolveu-se um saudável interesse das pessoas pela Ecologia, ciência que abrange outros ramos do conhecimento, além da Biologia. A consciência ecológica talvez seja a única alternativa para salvar a Terra da devastação imposta pelas sociedades industriais e tecnológicas.

Biosfera

No início de sua existência, a Terra era um planeta bem diferente do atual. Sua superfície era quentíssima, não permitindo a existência de água em estado líquido. Evidências recentes sugerem que a atmosfera terrestre, há 3,5 bilhões de anos, era muito diferente da atual, sendo constituída principalmente de gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e gás nitrogênio (N_2) (relembre no capítulo 2 do volume 1).

À medida que o planeta foi esfriando, água líquida foi acumulando-se nas depressões da crosta, originando os primeiros lagos e mares da Terra. O intenso bombardeamento por radiações solares teria causado alterações químicas e físicas nos componentes da atmosfera e da crosta terrestre, criando condições para o surgimento da vida.

Com o aparecimento dos seres vivos, há cerca de 3,5 bilhões de anos, uma nova entidade passou a fazer parte da constituição de nosso planeta. Além da litosfera (constituída pelas rochas e pelo solo), da hidrosfera (constituída pelas águas) e da atmosfera (constituída pelo ar), passou a existir a biosfera, representada pelos seres vivos e pelo ambiente em que vivem. O termo "biosfera" foi introduzido em 1875 pelo geólogo austríaco Eduard Suess (1831-1914), durante uma discussão sobre os vários envoltórios da Terra. Em 1926 e 1929, o mineralogista russo Vladimir Vernandsky (1863-1945) consagrou definitivamente o termo, utilizando-o em duas conferências de sucesso.

Biosfera é, portanto, a região do ambiente terrestre onde há seres vivos. Embora esse termo possa nos levar a pensar em uma camada contínua de regiões propícias à vida em torno do planeta, não é isso o que ocorre. Há locais tão secos ou tão frios em que praticamente não existem seres vivos. É o caso das regiões desérticas localizadas na faixa equatorial e das regiões geladas situadas junto aos pólos, onde pouquíssimas espécies conseguem viver. A biosfera estende-se desde as profundezas dos oceanos até o topo das mais altas montanhas. A maioria dos seres vivos habita regiões situadas até 5.000 m acima do nível do mar. Nos oceanos, a maioria dos seres vivos vive na faixa que vai da superfície até 150 m de profundidade, embora diversas espécies de animais e de bactérias vivam a mais de 9.000 m de profundidade. **(Fig. 13.2)**

▶ **Figura 13.2** • Representação dos limites da biosfera.

Populações, comunidades e biótopos

A biosfera é formada por milhões de espécies de seres vivos. As diferentes espécies distribuem-se em grupos de indivíduos, chamados de **populações biológicas**. Uma população é um conjunto de seres de mesma espécie que vive em determinada área geográfica.

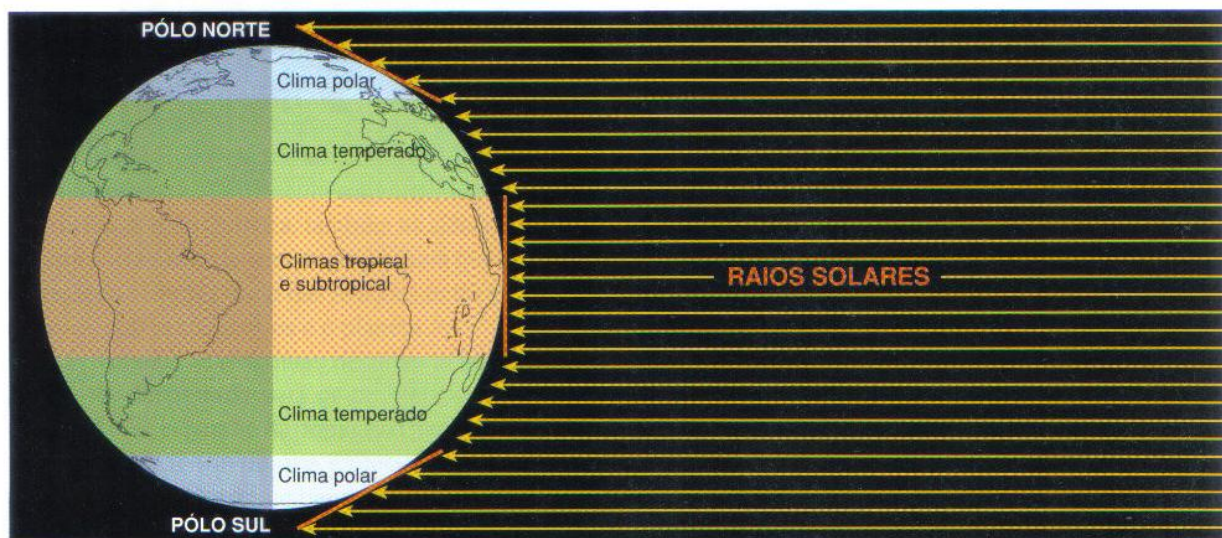
O conjunto de populações de diferentes espécies que vivem em uma mesma região constitui uma **comunidade biológica**, também chamada de **biota**, ou **biocenose**. O termo "biocenose" (do grego *bios*, vida, e *koinos*, comum, público) foi criado em 1877 pelo zoólogo alemão Karl August Möbius (1825-1908) para ressaltar a relação de vida em comum dos seres que habitam determinado local. A comunidade de uma floresta, por exemplo, compõe-se de populações de várias espécies de arbustos, árvores, pássaros, formigas, microrganismos etc., que convivem e se inter-relacionam.

Além de se inter-relacionar, os seres vivos de uma comunidade biológica, ou seja, os **componentes bióticos** da comunidade, interagem com os componentes não-vivos do ambiente, denominados **componentes abióticos**. Estes compreendem aspectos físicos e geoquímicos do meio, constituindo o **biótopo** (do grego *bios*, vida, e *topos*, lugar), termo que significa "região ambiental em que vive a biocenose". No exemplo da floresta, o biótopo é a área que contém o solo (com seus minerais e água) e a atmosfera (com seus gases, umidade, temperatura, grau de luminosidade etc.).

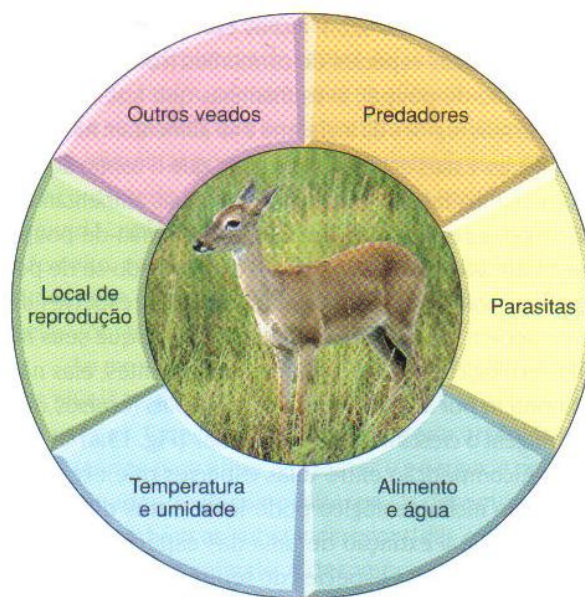
Os fatores físicos que atuam em determinada região da superfície terrestre constituem o **clima**, que resulta da ação combinada de luminosidade, temperatura, pressão, ventos, umidade e regime de chuvas. A radiação solar que atinge a Terra é um dos principais determinantes do clima. Além das radiações visíveis (luz) utilizadas pelos seres autotróficos na fotossíntese, a radiação solar inclui raios infravermelhos, responsáveis pelo aquecimento da atmosfera e do solo, o que contribui para manter na superfície terrestre as temperaturas favoráveis à vida. A temperatura ambiental é uma condição ecológica decisiva na distribuição dos seres vivos pelo planeta; poucas espécies conseguem viver em lugares extremamente quentes ou frios. A temperatura, por sua vez, influi em outros fatores climáticos, tais como os ventos, a umidade relativa do ar e a pluviosidade (índice de chuvas) de uma região. **(Fig. 13.3)**

Hábitat e nicho ecológico

O ambiente em que vive determinada espécie ou comunidade, caracterizado por suas propriedades físicas e bióticas, é seu **hábitat**. Quando dizemos que certa espécie vive na praia e que outra vive na copa das árvores, estamos nos referindo aos hábitats dessas espécies.

Cada espécie de ser vivo está adaptada a seu hábitat. Essa adaptação refere-se a um conjunto de relações e de atividades características da espécie no local, desde os tipos de alimento utilizados até as condições de reprodução, tipo de moradia, hábitos, inimigos naturais, estratégias de sobrevivência etc. Esse conjunto de interações adaptativas da espécie constitui seu **nicho ecológico**.

▲ **Figura 13.3** • As regiões localizadas na faixa equatorial recebem maior quantidade de radiação solar do que as situadas próximo dos pólos. A latitude, portanto, é uma das condições determinantes das condições climáticas da região.

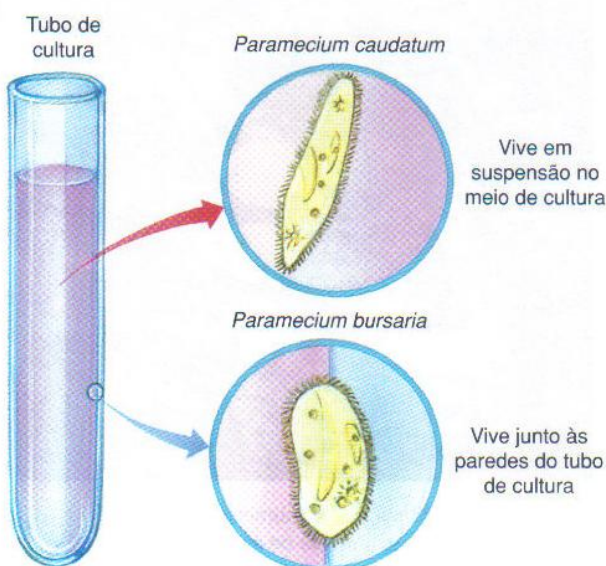
A palavra "nicho" (do italiano antigo *nicchio*) significa, originalmente, uma cavidade ou vão na parede onde se coloca uma estátua ou imagem. Por extensão, o termo "nicho" transmite a noção de um "ambiente restrito", que inspirou o conceito de nicho ecológico, desenvolvido em 1927 pelo zoólogo inglês Charles Sutherland Elton (1900-1991). Elton definiu nicho ecológico nos seguintes termos: "é o conjunto de relações e atividades próprias de uma espécie, ou seja, o 'modo de vida' único e particular que cada espécie explora no hábitat".

De acordo com o biólogo evolucionista Ernst Mayr, há duas maneiras de entender o conceito de nicho ecológico. Em uma visão clássica, haveria milhares de nichos em potencial em uma região, alguns dos quais estão ocupados pelas espécies que ali vivem. Segundo essa interpretação, o nicho é uma propriedade do ambiente. Muitos ecologistas, porém, consideram o nicho como uma propriedade da espécie que o ocupa, ou seja, o nicho ecológico é entendido como uma projeção daquilo que a espécie necessita do hábitat. **(Fig. 13.4)**

▲ **Figura 13.4** • Nicho ecológico refere-se à posição funcional de um organismo em seu ambiente, compreendendo seu hábitat, suas atividades e os recursos que ele obtém, enfim, todas as ações típicas de uma espécie no ambiente em que vive.

Competição e o princípio de Gause

Quando duas espécies de uma biocenose exploram nichos ecológicos semelhantes, estabelece-se entre elas uma **competição** por um ou mais recursos do meio. Por exemplo, espécies que comem capim, como os gafanhotos e o gado, competem por alimento quando este é escasso. Plantas cujas raízes ocupam a mesma região do solo competem por água e por nutrientes minerais.

Com base nessas observações, o cientista russo Georgyi Frantsevich Gause (1910-1986) concluiu que, se duas ou mais espécies ocuparem exatamente o mesmo nicho ecológico, a competição entre elas será tão severa que não poderão conviver. Segundo essa premissa, que ficou conhecida como **princípio de Gause**, ou **princípio da exclusão competitiva**, os nichos ecológicos são mutuamente exclusivos e a coexistência de duas ou mais espécies em um mesmo hábitat requer que seus nichos sejam suficientemente diferentes.

O princípio de Gause tem sido confirmado por diversos estudos, feitos com diferentes espécies de organismos. O próprio Gause verificou, em 1934, que populações de duas espécies do protozoário ciliado *Paramecium* (*P. caudatum* e *P. aurelia*) cresciam normalmente quando cultivadas em tubos separados. No entanto, quando mantidas juntas, a população de *P. caudatum* era eliminada pela competição. Por outro lado, *P. caudatum* e *Paramecium bursaria* podiam conviver no mesmo tubo de cultura. A razão é que, neste caso, uma das espécies vive livre no líquido, enquanto a outra vive junto às paredes do tubo. Seus nichos ecológicos são, portanto, suficientemente distintos para evitar uma competição mais intensa, que levaria à extinção de uma das espécies (veja outras informações sobre esse assunto no capítulo 15). **(Fig. 13.5)**

▲ **Figura 13.5** • *P. caudatum* e *P. bursaria* exploram diferentes nichos ecológicos, podendo conviver em um mesmo tubo de cultura.

Outros estudos sobre nichos ecológicos foram realizados com duas espécies de cormorões (cormorão-negro e cormorão-de-poupa), aves marinhas que fazem ninhos nas mesmas regiões da Inglaterra e se alimentam nas mesmas águas. Esses estudos mostraram que o cormorão-negro mergulha mais profundamente no mar, alimentando-se de peixes e camarões, enquanto o cormorão-de-poupa pesca em águas mais superficiais, alimentando-se de pequenos organismos do plâncton. Essas duas espécies de aves podem conviver no mesmo hábitat porque seus nichos ecológicos são suficientemente diferentes; elas não competem por alimento, um dos principais recursos que restringem o crescimento populacional. **(Fig. 13.6)**

A competição entre duas espécies que exploram o mesmo nicho ecológico pode levar a três diferentes situações: a) a extinção de uma das espécies; b) a expulsão de uma das espécies do território; c) a mudança de nicho ecológico de uma ou ambas as espécies, que deixam de competir por recursos escassos.

▲ **Figura 13.6** • O cormorão-de-poupa e o cormorão negro exploram diferentes nichos alimentares em seu hábitat aquático.

Ecossistema

O termo **ecossistema** foi utilizado pela primeira vez em 1935 pelo ecólogo inglês Arthur George Tansley (1871-1955) para descrever uma unidade discreta em que seres vivos (biocenose) e componentes não-vivos (biótopo) interagem, formando um sistema estável. Os princípios que definem um ecossistema aplicam-se em todas as escalas, desde um pequeno lago até o nível planetário. Assim, um ecossistema pode ser tanto uma floresta, um lago, uma ilha, um recife de corais ou um aquário auto-suficiente, com plantas, peixes, bactérias, algas etc. O maior ecossistema do planeta é a própria biosfera, considerada em sua totalidade. **(Fig. 13.7)**

▲ **Figura 13.7** • Acima, recife submerso e sua comunidade biológica, que vive de maneira altamente integrada. As ilustrações à direita mostram níveis de organização da vida no ecossistema do recife. As comunidades biológicas, em conjunto com os fatores não-vivos do meio (biótopo), compõem o ecossistema.

13.2 Cadeias e teias alimentares

Conceitos fundamentais na caracterização dos ecossistemas são o fluxo de energia, via cadeias alimentares e teias alimentares, e a ciclagem de nutrientes, através dos ciclos biogeoquímicos.

Os conceitos de cadeia alimentar e de teia alimentar

Cadeia alimentar é definida como a série linear de organismos pela qual flui a energia originalmente captada pelos seres autotróficos fotossintetizantes e quimiossintetizantes. Cada elo da cadeia, representado por um organismo, alimenta-se do organismo que o precede e serve de alimento para o organismo que o sucede. Na representação de uma cadeia alimentar considera-se que cada organismo ou espécie participante alimenta-se exclusivamente de um outro tipo de organismo. Por exemplo, em um ecossistema de campo, a série constituída por plantas de capim, que são comidas por gafanhotos, que são comidos por pássaros insetívoros, que são comidos por serpentes, constitui uma cadeia alimentar.

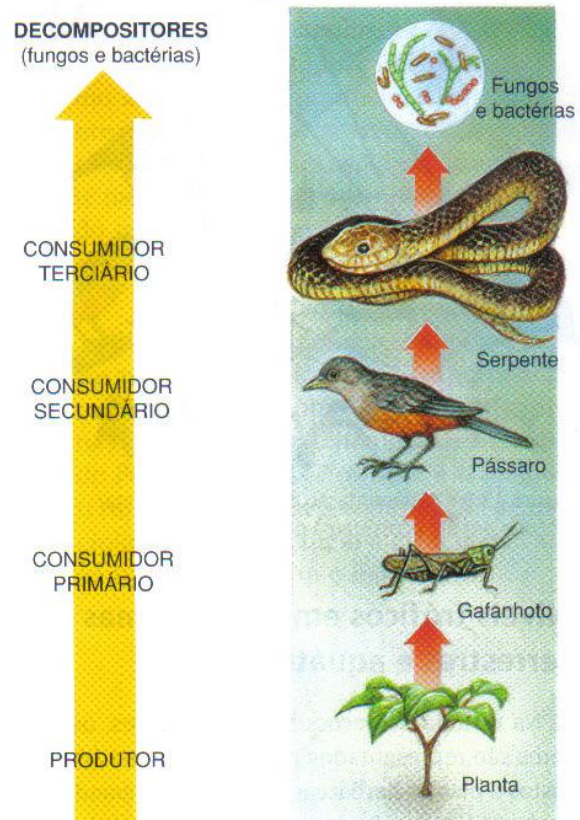
Uma cadeia alimentar geralmente apresenta três ou quatro elos, sendo raros os casos de mais de seis elos. O primeiro componente de uma cadeia alimentar é sempre um organismo autotrófico, em geral uma alga ou uma planta. Esse primeiro componente da cadeia é denominado **produtor**, pois é quem capta energia luminosa (ou energia química, no caso dos quimiossintetizantes) e a utiliza para a síntese de matéria orgânica, a partir de substâncias inorgânicas. Os demais componentes da cadeia, denominados **consumidores**, utilizam a energia captada pelos produtores e armazenada nas moléculas orgânicas que ingerem como alimento.

Produtores, consumidores e decompositores

Cada um dos elos de uma cadeia alimentar constitui um **nível trófico**. Os produtores formam o primeiro nível trófico de qualquer cadeia alimentar. Os seres que se alimentam diretamente dos produtores, denominados **consumidores primários**, constituem o segundo nível trófico; os seguintes, que se alimentam dos consumidores primários, denominados **consumidores secundários**, constituem o terceiro nível trófico e assim por diante. **(Fig. 13.8)**

Consideremos como exemplo a cadeia alimentar constituída por: plantas de capim, gafanhotos que se alimentam de capim, pássaros que se alimentam dos gafanhotos e serpentes que se alimentam dos pássaros. Essa cadeia alimentar possui quatro níveis tróficos: o primeiro é constituído pelas plantas de capim (produtores); o segundo, pelos gafanhotos (consumidores primários); o terceiro, pelos pássaros insetívoros (consumidores secundários); o quarto e último nível trófico é constituído pelas cobras (consumidores terciários).

Ao morrer, produtores e consumidores dos diversos níveis tróficos servem de alimento a certos fungos e bactérias. Estes decompõem a matéria orgânica dos seres mortos para obter nutrientes e energia, e por isso são chamados de **decompositores**. Os decompositores utilizam também as substâncias contidas em resíduos e excreções dos animais. A decomposição é importante por permitir a reciclagem dos átomos de elementos químicos, que podem voltar a fazer parte de outros seres vivos.

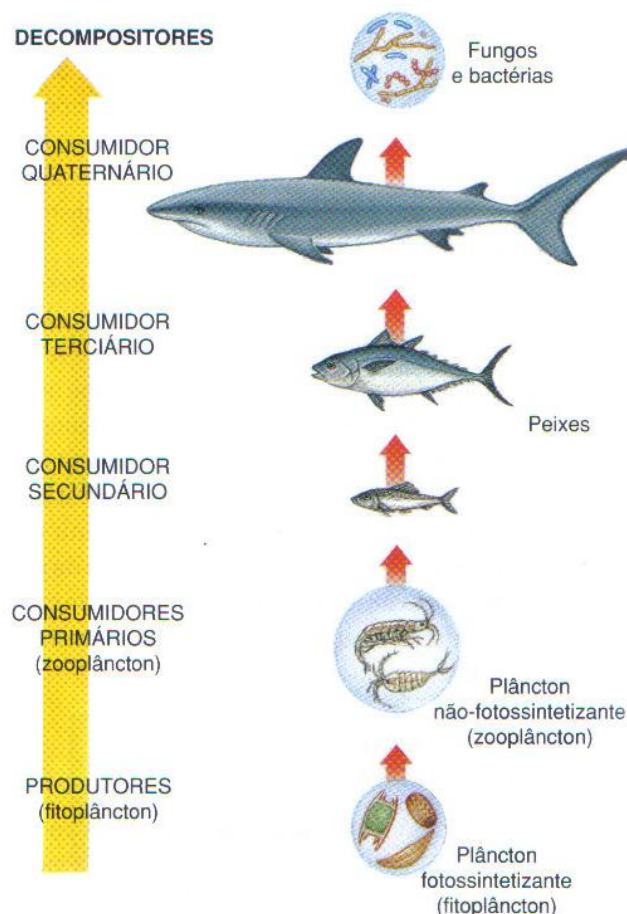
Cadeias alimentares não ocorrem isoladas nos ecossistemas, uma vez que as relações alimentares en-

▲ **Figura 13.8** • Representação de uma cadeia alimentar de terra firme. Os decompositores atuam em todos os níveis da cadeia (indicado pela seta amarela).

tre os organismos de uma comunidade são muito complexas, com um mesmo organismo participando de diversas cadeias alimentares, até mesmo em níveis tróficos diferentes. Por exemplo, um animal que possui alimentação variada, comendo tanto plantas quanto outros animais, desempenha o papel de consumidor primário, no primeiro caso, e de consumidor secundário ou terciário, no segundo. Esse é o caso da espécie humana que, por ter alimentação variada, é chamada de **onívora** (do latim *omnis*, tudo, e *vorare*, comer, devorar).

As relações alimentares entre os diversos organismos de um ecossistema costumam ser representadas por meio de diagramas, denominados **teias alimentares**, ou redes alimentares. Estes compõem-se de diversas cadeias alimentares interligadas por meio de linhas, que unem os diversos componentes da comunidade entre si, evidenciando suas relações alimentares. **(Fig. 13.9)**

Os consumidores primários de uma floresta podem variar desde pequenos invertebrados (minhocas, insetos, caracóis etc.) até vertebrados (sapos, cobras, pássaros, roedores etc.). No mar e nos lagos, os consumidores primários são os constituintes do **zooplâncton** (do grego *zoon*, animal), ou **plâncton não-fotossintetizante**; estes são protozoários, pequenos crustáceos, vermes, moluscos e larvas de diversas espécies. Outros consumidores de fitoplâncton, além dos animais do zooplâncton, são certas espécies de peixe.

Os consumidores secundários e terciários de uma floresta são insetos predadores, anfíbios e aves insetívoras, serpentes, aves de rapina, répteis e mamíferos carnívoros, entre outros. No mar e nos lagos, os consumidores secundários e terciários são principalmente os peixes. **(Fig. 13.10)**

▲ **Figura 13.9** • Representação de uma teia alimentar que ocorre em um ecossistema de terra firme.

▲ **Figura 13.10** • Representação de uma cadeia alimentar marinha. Nos ecossistemas marinhos, os produtores são representados principalmente pelo fitoplâncton. Há peixes em diferentes níveis tróficos, dependendo de seu tipo de alimentação. A seta amarela representa a relação dos decompositores com todos os níveis tróficos.

Níveis tróficos em ecossistemas terrestres e aquáticos

Na maioria dos ecossistemas terrestres, os produtores são representados por plantas como árvores, arbustos e plantas herbáceas. No mar e nos grandes lagos, os produtores são seres microscópicos, principalmente bactérias e algas, que flutuam próximo à superfície, constituindo o **fitoplâncton** (do grego *phyton*, planta, e *plankton*, errante) ou **plâncton fotossintetizante**.

LEITURA

ECOSSISTEMAS E PESSOAS

Hoje não há nada mais importante para a humanidade do que compreender como a natureza funciona. O futuro de nossa sociedade está na dependência de o *Homo sapiens* aprender a viver sem danificar a máquina da natureza, a ponto de ela não poder mais sustentar a civilização. Assim sendo, nenhuma ciência, na verdade nenhum aspecto da cultura humana, é mais importante do que a Ecologia, o estudo das interações entre os organismos e o ambiente físico.

Há, evidentemente, partes importantes da Ecologia que normalmente não têm aplicação direta a temas ambientais. Mesmo assim, são de grande interesse intelectual e teórico. Por exemplo, os ecologistas explicaram por que os machos de certas espécies de pássaros são monógamos e outros têm haréns. Essa foi uma descoberta de grande valor intrínseco, mas de pouca aplicabilidade no dia-a-dia das pessoas.

Aspectos práticos da Ecologia são o estudo das relações entre nossa espécie e os demais seres vivos, e o estudo do impacto das atividades humanas sobre o ambiente natural. Entre outras coisas, a Ecologia fornece diretrizes para que se possam estabelecer sistemas agrícolas auto-sustentáveis, capazes de suportar a crescente população humana.

Os princípios básicos da Ecologia são acessíveis a qualquer pessoa disposta a dedicar um pequeno esforço para compreendê-los. E esse esforço compensa. A familiaridade com a Ecologia básica mudará para sempre sua visão de mundo. Você nunca mais considerará as plantas, os microrganismos e os animais, incluindo as pessoas, como entidades isoladas. Ao contrário, você os verá como partes de uma grande e complexa máquina, como elementos relacionados de um sistema em pleno funcionamento.

Para compreender a máquina da natureza, você precisará entender não apenas como ela opera hoje, mas como foi construída nesses bilhões de anos. O processo de construção, chamado de evolução biológica, foi de tentativa e erro. O curso da construção foi sendo alterado por diversos tipos de eventos, desde o relativo sucesso ou insucesso de partes da máquina ecológica até destruições catastróficas de seções inteiras. A evolução não teve finalidade, nem foi direcionada; mesmo assim ela nos produziu, e a todos os nossos companheiros vivos, além de ter moldado importantes aspectos do ambiente físico. Em resumo, vivemos em um mundo que evoluiu, e no qual a humanidade evoluiu conjuntamente.

Minha definição de Ecologia é bem ampla. Ela inclui a Biologia Evolutiva e certos aspectos da Biologia do Comportamento; abrange uma combinação de disciplinas, algumas vezes denominadas Biologia de Populações. Mas *Ecologia* é o melhor termo para designar a combinação de disciplinas que constituem a ciência da vida na Terra, e é também o mais curto.

• **Fonte:** Paul R. Ehrlich, *The machinery of nature.* Nova York: Simon & Schuster, 1987, p. 12-14. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

13.1 Conceitos básicos em Ecologia

1. Conceitue Ecologia e comente por que ela é uma ciência multidisciplinar.

2. Comente por que a Ecologia é um ramo do conhecimento que, nas últimas décadas, tem assumido importância crescente.

3. Conceitue biosfera.

4. Conceitue: a) população biológica; b) comunidade biológica (biocenose); c) biótopo.

5. Conceitue hábitat.

6. Conceitue nicho ecológico.

7. Em que consiste o princípio da exclusão de Gause?

8. O que poderia ocorrer com duas espécies que compartilhassem aspectos importantes de seus nichos ecológicos?

9. Conceitue ecossistema.

13.2 Cadeias e teias alimentares

10. Conceitue cadeia alimentar, exemplificando.

11. O que são níveis tróficos?

12. O que são decompositores?

13. Explique o que são teias alimentares.

14. O que são organismos onívoros?

15. Quem são os produtores e os consumidores em:
a) ecossistemas terrestres; b) ecossistemas aquáticos?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

16. Qual dos conceitos de Ecologia engloba tanto componentes bióticos como abióticos?
a) Biótopo.
b) Comunidade biológica.
c) Ecossistema.
d) População biológica.

17. Cianobactérias e bactérias quimiossintetizantes ocupam o nível trófico dos
a) consumidores primários.
b) consumidores secundários.
c) decompositores.
d) produtores.

Utilize as informações a seguir para responder às questões de 18 a 20.

Na frase a seguir, os números 1, 2 e 3 sucedem e identificam três conceitos. "Um *grupo de sagüis* (1) vive na *copa das árvores* (2) de uma *floresta* (3)."

18. Qual número refere-se ao ecossistema?

19. Qual número refere-se à população biológica?

20. Qual número refere-se ao hábitat?

21. Uma teia alimentar é constituída por árvores frutíferas, bactérias e fungos do solo, coelhos, capim, serpentes, gafanhotos, gaviões e insetos frutívoros (isto é, que comem frutos). Os consumidores secundários são
a) árvores frutíferas, bactérias e fungos.
b) bactérias e fungos.
c) coelhos, serpentes e gaviões.
d) serpentes e gaviões.
e) insetos frutívoros e gafanhotos.

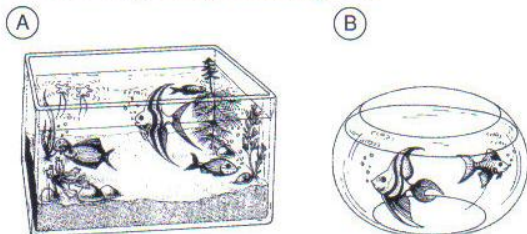
22. Pernilongos-machos sugam seiva de plantas, enquanto pernilongos-fêmeas sugam sangue de animais. Pode-se dizer que eles são, respectivamente,
a) consumidores primários, ambos.
b) consumidores secundários, ambos.
c) consumidor primário; consumidor secundário ou superior.
d) produtor; consumidor secundário ou superior.
e) consumidor secundário; consumidor quaternário.

23. Onívora é
a) qualquer espécie que tenha alimentação diferente da alimentação humana.
b) a denominação dos organismos que ocupam mais de um nível trófico na cadeia alimentar.
c) a espécie que ocupa sempre o mesmo nível trófico na cadeia alimentar.
d) outra denominação dada ao nível trófico dos decompositores.

QUESTÕES DISCURSIVAS

24. Dados os habitantes de um lago, esquematize uma teia alimentar.
a) Algas do fitoplâncton.
b) Crustáceos do zooplâncton.
c) Peixes (herbívoros) que se alimentam do fitoplâncton.
d) Peixes (carnívoros) que se alimentam de outros peixes.
e) Bactérias e fungos.
f) Plantas lacustres.
g) Peixes (herbívoros) que se alimentam de zooplâncton.

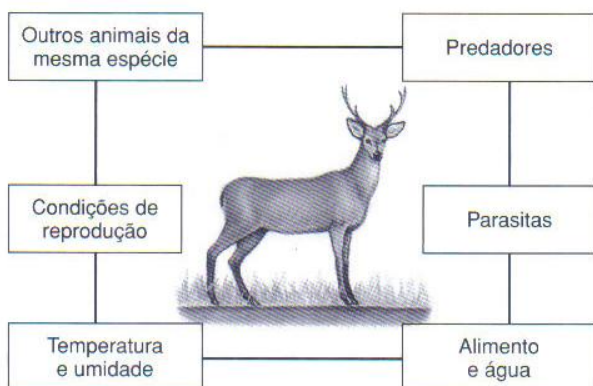
25. Construa as relações existentes, quanto à alimentação, entre os seguintes seres vivos:
Plantas de alfafa
Gafanhotos
Corruíras (pássaro insetívoro)
Piolhos
Víboras
Corujas
Mosquitos hematófagos
Coelhos
Fungos e bactérias do solo

26. Qual dos dois aquários se assemelha mais a um ecossistema? Justifique sua resposta.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

27. (UFSM-RS) Na região da Quarta Colônia Italiana, no estado do RS, encontram-se fragmentos de mata atlântica, o que levou essa região a ser incorporada à Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, reconhecida pela UNESCO em 1993. A importância dessa Reserva reside na grande biodiversidade presente e no impedimento de sua extinção.
Qual dos conceitos ecológicos a seguir abrange mais elementos da biodiversidade?
a) Espécie.
b) População.
c) Nicho.
d) Comunidade.
e) Hábitat.

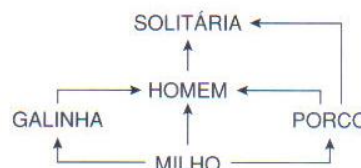
28. (UFPE) Ao dizer onde uma espécie pode ser encontrada e o que faz no lugar onde vive, estamos informando, respectivamente,
a) nicho ecológico e hábitat.
b) hábitat e nicho ecológico.
c) hábitat e biótopo.
d) nicho ecológico e ecossistema.
e) hábitat e ecossistema.

29. (UFPE) Na figura a seguir está ilustrado um importante conceito ecológico que engloba desde a maneira pela qual uma espécie se alimenta até suas condições de reprodução, hábitos, inimigos naturais etc. Este conceito é conhecido como

a) níveis tróficos.
b) biota ou biocenose.
c) biótopo.
d) nicho ecológico.
e) hábitat.

30. (UFSM-RS) O conjunto de indivíduos da mesma espécie que habita determinada região geográfica é chamado
a) comunidade.
b) nicho ecológico.
c) ecossistema.
d) população.
e) bioma.

31. (Fuvest-SP) O cogumelo shitake é cultivado em troncos, onde suas hifas nutrem-se das moléculas orgânicas componentes da madeira. Uma pessoa, ao comer cogumelos shitake, está se comportando como
a) produtor.
b) consumidor primário.
c) consumidor secundário.
d) consumidor terciário.
e) decompositor.

32. (PUC-RS) Os estudos que visam à proteção do fitoplâncton marinho são muito importantes para a preservação da vida em nosso planeta. A destruição desse tipo de plâncton atingiria a cadeia alimentar marinha justamente ao nível dos
a) consumidores primários.
b) produtores.
c) consumidores secundários.
d) consumidores terciários.
e) decompositores.

33. (Ufal) O esquema abaixo mostra as relações tróficas em uma propriedade rural.

De acordo com o esquema, o homem é
a) produtor.
b) somente consumidor primário.
c) somente consumidor secundário.
d) somente consumidor terciário.
e) consumidor primário e secundário.

34. (UFC-CE) Leia com atenção o texto a seguir.
"Todo ano o ciclo da vida se repete no Pantanal Matogrossense. Durante a estação das chuvas, os rios transbordam e alagam os campos onde se formam banhados, lagoas e corixos temporários. O gado é levado em comitivas para as partes altas. Aproveitando a inundação, os peixes saem dos rios e espalham-se por toda a área inundada. Quando as chuvas param e os rios voltam a seus leitos, milhões de peixes ficam aprisionados nas lagoas. É um banquete para aves, jacarés e ariranhas. Os pastos, renovados pela matéria orgânica trazida pela água, crescem verdes atraindo cervos, capivaras e outros animais que convivem com o gado, os quais, por sua vez, atraem onças e jaguatiricas."

(Revista VEJA, 02 de junho de 1999)

Com base no texto anterior, assinale a alternativa que representa uma cadeia alimentar, começando pelos produtores e terminando com os consumidores secundários:
a) rios, ariranhas e peixes;
b) pastos, capivaras e onças;
c) campos, gado e capivaras;
d) pastos, jacarés e aves;
e) campos, jaguatiricas e cervos.

35. (UFSCar-SP) Pode-se afirmar que fitoplâncton
a) é constituído por organismos heterótrofos.
b) representa a comunidade dos produtores do plâncton.
c) não depende da presença de luz para se desenvolver.
d) representa a comunidade dos consumidores do plâncton.
e) é representado por organismos que se deslocam ativamente na água.

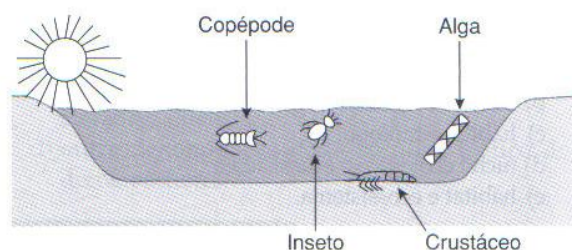
36. (PUC-Campinas-SP) Uma grande área de vegetação foi devastada e esse fato provocou a emigração de diversas espécies de consumidores primários para uma comunidade vizinha em equilíbrio. Espera-se que, nesta comunidade, em um primeiro momento,
a) aumente o número de consumidores secundários e diminua a competição entre os herbívoros.
b) aumente o número de produtores e diminua a competição entre os carnívoros.
c) aumente o número de herbívoros e aumente a competição entre os carnívoros.
d) diminua o número de produtores e não se alterem as populações de consumidores.
e) diminua o número de produtores e aumente a competição entre os herbívoros.

37. (Fuvest-SP) O modo de nutrição das bactérias é muito diversificado: existem bactérias fotossintetizantes, que obtêm energia da luz; bactérias quimiossintetizantes, que obtêm energia de reações químicas inorgânicas; bactérias saprofágicas, que se alimentam de matéria orgânica morta; bactérias parasitas, que se alimentam de hospedeiros vivos.
Indique a alternativa que relaciona corretamente cada um dos tipos de bactéria mencionados com sua posição na teia alimentar.

	Fotossintetizante	Quimiossintetizante	Saprofágica	Parasita
a)	Decompositor	Produtor	Consumidor	Decompositor
b)	Consumidor	Consumidor	Decompositor	Consumidor
c)	Produtor	Consumidor	Decompositor	Decompositor
d)	Produtor	Decompositor	Consumidor	Consumidor
e)	Produtor	Produtor	Decompositor	Consumidor

38. (UFPE) Os seres vivos não são entidades isoladas. Eles interagem em seu ambiente com outros seres vivos e com componentes físicos e químicos. São afetados pelas condições desse ambiente. Com relação ao ecossistema marinho, assinale a alternativa correta
a) O Zooplâncton e o Fitoplâncton representam os organismos produtores (autotróficos) nas cadeias alimentares marinhas.
b) Os consumidores secundários e terciários, nos mares, são representados principalmente por peixes.
c) No ambiente marinho, não existem decompositores.
d) As diatomáceas são os principais representantes do Zooplâncton.
e) Todos os seres do Zooplâncton marinho são macroscópicos.

39. (PUC-RJ) Quando nos referimos ao ecossistema de um lago, dois conceitos são muito importantes: o ciclo dos nutrientes e o fluxo de energia. A energia necessária aos processos vitais de todos os elementos deste lago é reintroduzida neste ecossistema
a) pela respiração dos produtores.
b) pela captura direta por parte dos consumidores.
c) pelo processo fotossintético.
d) pelo armazenamento da energia nas cadeias tróficas.
e) pela predação de níveis tróficos inferiores.

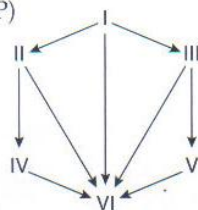
40. (Uerj) Na maioria dos casos, a energia de um ecossistema origina-se da energia solar.
A figura a seguir mostra alguns seres componentes do ecossistema de um lago.

Considere que, no lago, existam quatro diferentes espécies de peixes. Cada uma dessas espécies se alimenta exclusivamente de um dos quatro componentes indicados.

O peixe que teria melhores condições de desenvolvimento, em função da disponibilidade energética, seria o que se alimentasse de
a) algas.
b) insetos.
c) copépodes.
d) crustáceos.

41. (PUC-SP) Em uma lagoa de água doce, são encontrados organismos como microcrustáceos (I), que se alimentam de fitoplâncton (II) e são animais predados por insetos aquáticos (III) e também por peixes pequenos (IV). Os insetos, por sua vez, servem de alimento para peixes maiores (V). Através da atividade de certas bactérias (VI) presentes no lago, substâncias orgânicas são degradadas e seus produtos, liberados no ambiente, podem ser reutilizados por todos os organismos.

Na tabela abaixo, que letra apresenta correspondência correta com a descrição?

	Produtores	Consumidores Primários	Consumidores Secundários	Consumidores Terciários	Competidores
a)	I	II	III	IV	V e IV
b)	I	II	III, IV e V	V e VI	III e IV
c)	II	I	III, IV e V	VI	III, IV e V
d)	II	I	III e IV	V	III e IV
e)	VI	I	II	III e IV	III, IV e V

42. (Mackenzie-SP)

A respeito da teia alimentar representada acima, considere as seguintes afirmações:

I. Fungos não podem ocupar o nível I.
II. Bactérias podem ocupar os níveis I e VI.
III. Aves podem ocupar os níveis II e V.
IV. Algas podem ocupar os níveis I e VI.

Assinale:

a) se apenas I estiver correta.
b) se apenas II e III estiverem corretas.
c) se apenas II, III e IV estiverem corretas.
d) se apenas I, II e III estiverem corretas.
e) se apenas IV estiver correta.

QUESTÕES DISCURSIVAS

43. (Vunesp) Considere a afirmação: "As populações daquele ambiente pertencem a diferentes espécies de animais e vegetais".
Que conceitos estão implícitos nessa frase, se levarmos em consideração:

a) somente o conjunto de populações?
b) o conjunto de populações mais o ambiente abiótico?

44. (Vunesp) A tabela mostra um exemplo de transferência de energia em um ecossistema, do qual se considerou uma cadeia alimentar de predadores.

Níveis tróficos	Quantidade de energia (kcal/m²/ano)		
	Total assimilado pelos organismos	Quantidade disponível para os níveis tróficos seguintes	Diferença
Produtores	21 000	9 000	12 000
Consumidores primários	11 000	4 600	6 200
Consumidores secundários	3.500	1 500	2 000
Consumidores terciários	500	100	400

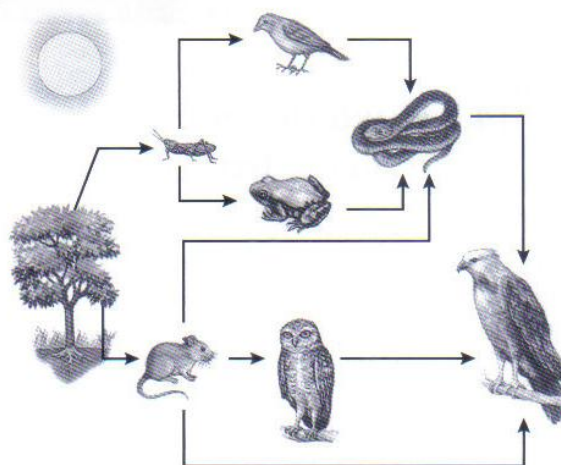
Baseando-se nos dados da tabela, responda:

a) A que corresponde a quantidade de energia discriminada na coluna "Diferença"?
b) Dificilmente esta cadeia alimentar, cujo fluxo de energia está representado na tabela, apresentará consumidores quaternários. Por quê?

45. (Fuvest-SP) A tabela a seguir mostra medidas, em massa seca por metro quadrado (g/m^2), dos componentes de diversos níveis tróficos em um dado ecossistema.

Níveis tróficos	Massa seca (g/m^2)
Produtores	809
Consumidores primários	37
Consumidores secundários	11
Consumidores terciários	1,5

a) Por que se usa a massa seca por unidade de área (g/m^2), e não a massa fresca, para comparar os organismos encontrados nos diversos níveis tróficos?
b) Explique por que a massa seca diminui progressivamente em cada nível trófico.
c) Nesse ecossistema, identifique os níveis tróficos ocupados por cobras, gafanhotos, musgos e sapos.

46. (UFV) Na maioria dos ecossistemas naturais encontramos vários tipos de produtores e de consumidores. A existência de várias opções alimentares interliga as cadeias em uma teia alimentar, como exemplificado abaixo.

Com base na figura e nos conceitos ecológicos, resolva os itens:

a) A qual(is) ordem(ns) de consumidor(es) pertence a cobra?
b) Independentemente da ordem que ocupam, quantos consumidores pertencem a um único nível trófico?
c) Explique como gavião poderia ocupar o nível trófico inferior ao da cobra.

CAPÍTULO

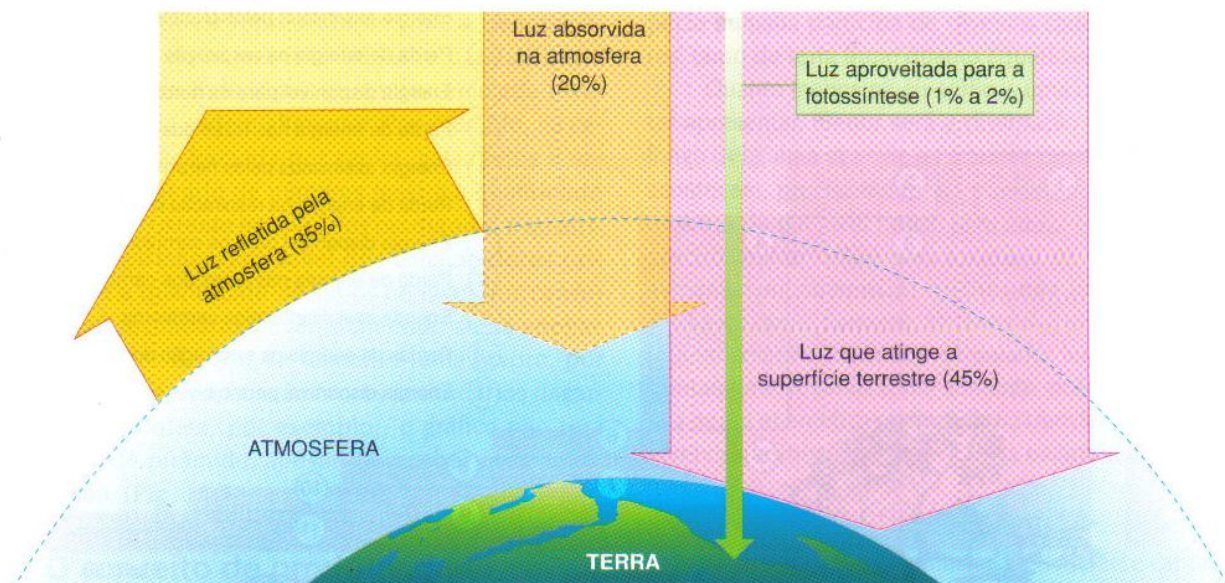
14 ENERGIA E MATÉRIA NOS ECOSSISTEMAS

▶ Um banco de coral reúne uma comunidade de seres marinhos na qual energia e matéria fluem entre os níveis tróficos.

14.1 Fluxo de energia e níveis tróficos

O Sol é o principal responsável pela existência de vida na Terra. Em primeiro lugar, porque as radiações solares aquecem o solo, as massas de água e o ar, criando um ambiente favorável à vida. Em segundo lugar, porque a luz solar é captada pelos seres fotossintetizantes e transferida de um organismo para outro, ao longo das cadeias alimentares, permitindo a existência de praticamente todos os ecossistemas da Terra. **(Fig. 14.1)**

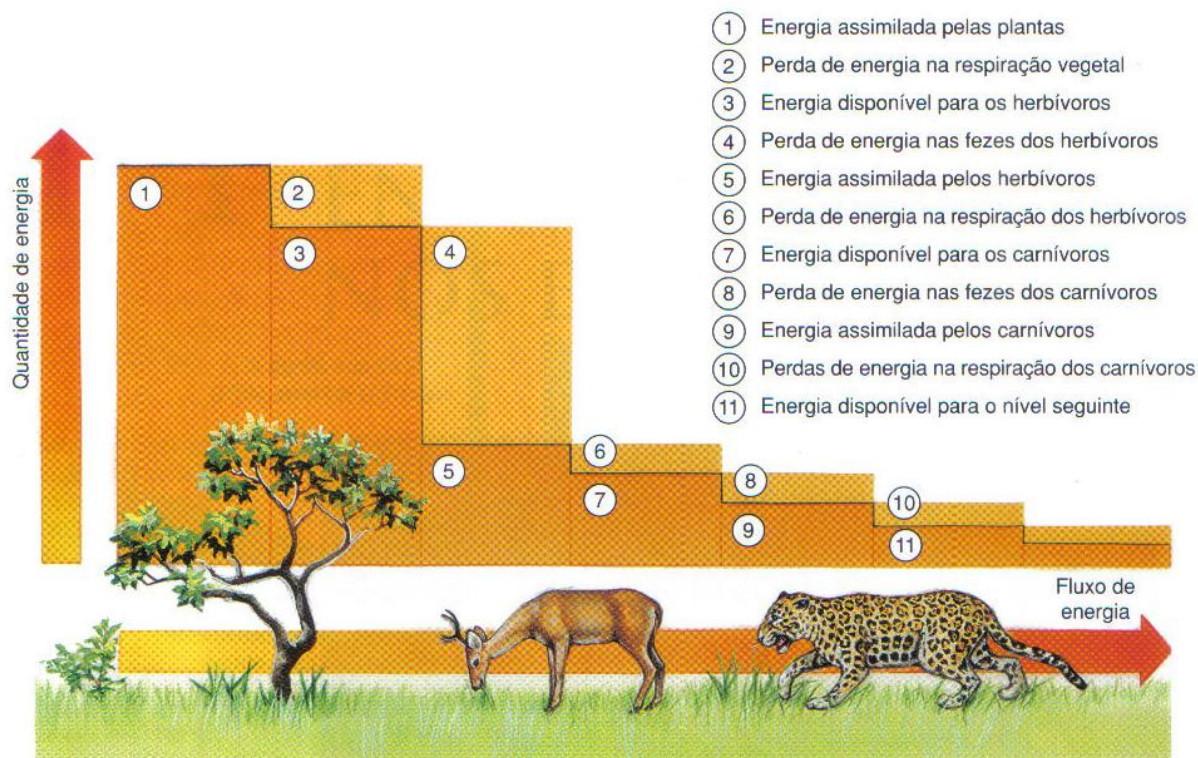
A energia luminosa captada por algas, plantas e bactérias fotossintetizantes é utilizada na produção de substâncias orgânicas, nas quais fica armazenada como energia potencial química. Ao comer seres fotossintetizantes, os consumidores primários aproveitam a energia contida nas moléculas das substâncias orgânicas ingeridas, utilizando-a em seus processos vitais, inclusive na síntese de suas próprias substâncias orgânicas. Os consumidores secundários, por sua vez, ao comer consumidores primários, utilizam as substâncias destes como fonte de energia, e assim por diante. Portanto, a transferência de energia na cadeia alimentar é **unidirecional**; ela tem início com a captação da energia luminosa pelos produtores e termina com a ação dos decompositores. Em cada nível trófico, parte da energia armazenada nas moléculas orgânicas é utilizada na realização de trabalho e liberada na forma de calor. **(Fig. 14.2)**

Em uma cadeia alimentar, portanto, a quantidade de energia presente em um nível trófico é sempre maior que a energia que pode ser transferida ao nível seguinte. Isso ocorre porque todos os seres vivos consomem parte da energia do alimento para a manutenção de sua própria vida e não transferem essa parcela para o nível trófico seguinte. Por exemplo, do total de matéria orgânica produzida por uma planta, cerca de 15% são degradados no processo de respiração celular, produzindo a energia necessária à manutenção dos processos vitais. Desse modo, quando comem plantas, os herbívoros têm à sua disposição apenas 85% da energia originalmente armazenada nas substâncias orgânicas produzidas pela fotossíntese.

▲ **Figura 14.1** • Mais de metade da radiação solar que atinge a Terra não chega até o solo. Aproximadamente 35% dessa radiação é refletida pelas nuvens e poeira e quase 20% é absorvida pelo vapor d'água e outras moléculas da atmosfera. Da energia solar que chega efetivamente à superfície, apenas de 1% a 2% é aproveitada para a fotossíntese.

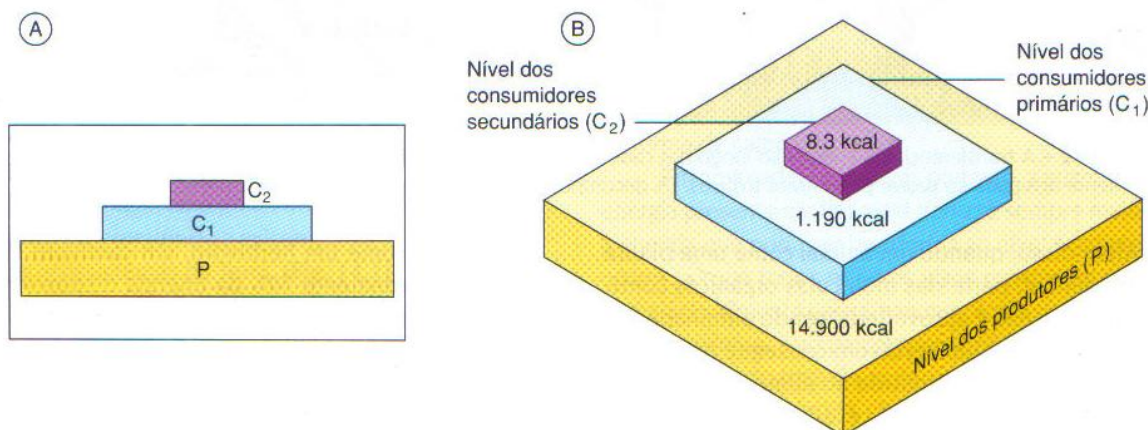
▲ **Figura 14.2** • A transferência de energia ao longo das cadeias alimentares é unidirecional. A energia é gradualmente dissipada ao passar pelos níveis tróficos. Os decompositores atuam em todos os níveis tróficos.

Além disso, quando um animal come uma planta ou outro animal, parte das moléculas orgânicas contida no alimento não é aproveitada, sendo eliminada nas fezes. Por exemplo, um herbívoro consegue aproveitar apenas 10% da energia contida no alimento que ingere; o restante, cerca de 90%, é eliminado nas substâncias que compõem as fezes do animal. Da energia efetivamente aproveitada, cerca de 15% a 20% são empregados na manutenção do metabolismo, e o que sobra fica armazenada nas substâncias que compõem os tecidos corporais.

Quando come um herbívoro, um carnívoro aproveita aproximadamente 50% da energia disponível no alimento que ingere, sendo o restante eliminado nas fezes. Da metade aproveitada, 15% a 20% são utilizados na manutenção do metabolismo. O mesmo ocorre nos níveis tróficos seguintes.

Assim, a energia captada originalmente do Sol vai se dissipando como calor ao longo dos níveis tróficos dos ecossistemas. Conseqüentemente, para manter-se, estes dependem da absorção constante de energia luminosa do Sol. **(Fig. 14.3**, na página seguinte**)**

▲ **Figura 14.3** • Gráfico que representa as quantidades de energia disponíveis para cada nível trófico de uma cadeia alimentar. A cada nível, parte da energia é dissipada como calor, durante as atividades metabólicas dos organismos, e parte é eliminada nas fezes. O que sobra pode ser transferido ao nível trófico seguinte.

Pirâmides de energia

A massa total de matéria orgânica contida em um ser vivo (ou em um conjunto de seres vivos) é a **biomassa**; ela reflete a quantidade de energia química potencial disponível para o nível trófico seguinte. Em uma teia alimentar, a biomassa contida em cada nível trófico pode ser representada por gráficos em forma de pirâmide, que constituem as chamadas **pirâmides de energia**. Nesse tipo de representação, a base corresponde ao nível trófico dos produtores e, na seqüência, são representados os níveis dos consumidores primários, dos consumidores secundários e assim por diante. A largura de cada nível representa a quantidade de energia presente na matéria orgânica disponível para o nível trófico seguinte. **(Fig. 14.4)**

▲ **Figura 14.4** • Uma pirâmide de energia mostra a quantidade de energia química potencial disponível em cada nível trófico de um ecossistema. As representações podem ser tanto planas (**A**) como tridimensionais (**B**). As pirâmides de biomassa têm forma semelhante à das pirâmides de energia, pois a massa de matéria orgânica reflete a quantidade de energia química disponível em cada nível trófico.

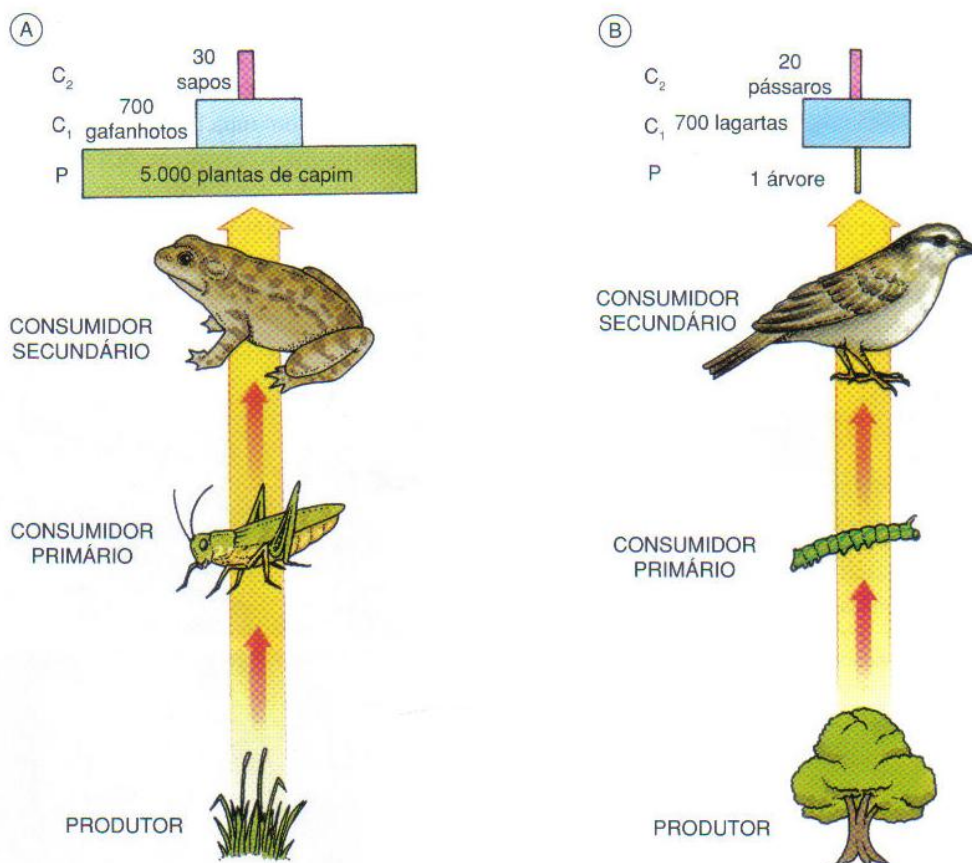
Outro tipo de representação gráfica, denominada **pirâmide de números**, é utilizado para indicar a quantidade de indivíduos existentes em cada nível trófico de uma cadeia alimentar. Por exemplo, na cadeia alimentar formada por capim, gafanhotos e sapos, uma pirâmide de números mostra a quantidade de plantas existente no nível dos produtores, a quantidade de gafanhotos no nível dos consumidores primários e a quantidade de sapos no nível dos consumidores secundários. Eventualmente, se há apenas um produtor de grande tamanho (uma árvore, por exemplo) e muitos consumidores secundários (lagartas de borboleta, por exemplo), o gráfico não terá formato de pirâmide, apesar de receber essa denominação. **(Fig. 14.5)**

O conceito de produtividade

O estudo da transferência de energia entre seres vivos pertencentes a níveis tróficos diferentes é de grande importância para a humanidade, uma vez que a espécie humana participa de diversas cadeias alimentares, tanto de terra firme quanto aquáticas.

Quanto menos níveis tróficos uma cadeia alimentar apresentar, menor será a dissipação energética ao longo dela, uma vez que as maiores perdas de energia acontecem, precisamente, na transferência de matéria orgânica de um nível trófico para outro. Por exemplo, é preciso utilizar quase uma tonelada de vegetais para alimentar um número de coelhos que forneça apenas 250 kg de carne. Portanto, é menos dispendioso, embora nem sempre adequado ao paladar humano, utilizar diretamente vegetais como alimento, pois assim se evita a perda energética que ocorre na transferência para o nível dos herbívoros. **(Fig. 14.6**, na página seguinte**)**

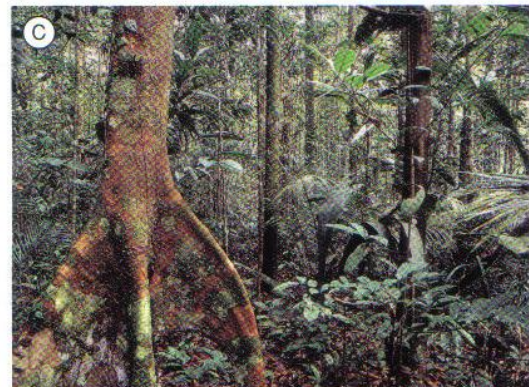
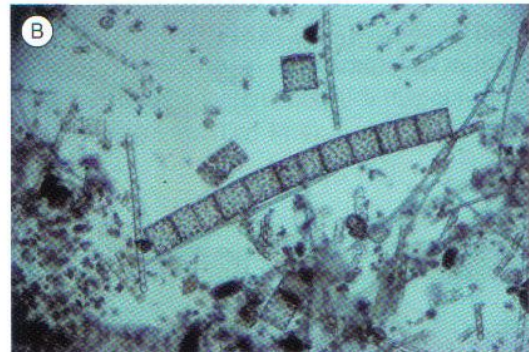
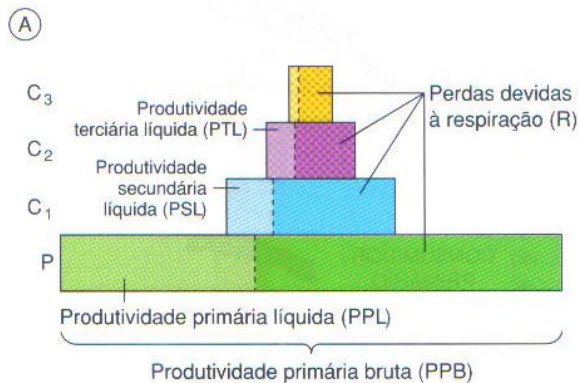
Produtividade primária

O total de energia luminosa efetivamente captada pelos seres autotróficos, ou seja, a quantidade de energia que os seres fotossintetizantes conseguem converter em biomassa, em determinado intervalo de tempo, constitui a chamada **produtividade primária bruta (PPB)**.

▲ **Figura 14.5** • Pirâmides de números. **A.** A forma típica de pirâmide, com base larga e ápice estreito, representa cadeias alimentares nas quais os produtores são plantas pequenas (capim, por exemplo) e os herbívoros e predadores são relativamente grandes. **B.** No gráfico representativo de cadeias alimentares em que os produtores são de grande tamanho (uma árvore, por exemplo) e os herbívoros são relativamente pequenos (lagartas, por exemplo), a base do gráfico é reduzida, formando uma pirâmide atípica.

▲ **Figura 14.6** • Produtos de origem vegetal são, em média, de produção mais barata que os de origem animal; para alimentar os animais, é preciso investir na formação das pastagens.

Como já vimos, parte da energia luminosa armazenada na matéria orgânica é gasta na respiração celular do próprio organismo fotossintetizante, para suprir suas necessidades básicas de sobrevivência. Apenas a quantidade de energia que sobra fica armazenada na biomassa. A energia armazenada na biomassa dos produtores, medida durante um determinado intervalo de tempo, constitui a **produtividade primária líquida (PPL)**. É essa energia que está realmente disponível para o nível trófico seguinte. Assim, representando as perdas energéticas na respiração celular por **R**, temos: **PPL = PPB − R**.

A eficiência dos produtores de um ecossistema pode ser avaliada pela produtividade primária líquida. Um estudo mostrou que um ecossistema marinho, em que os produtores são principalmente algas do fitoplâncton, produz cerca de 35% a mais de matéria orgânica por ano do que uma floresta tropical, onde os produtores são representados por diversos tipos de planta.

A explicação para a maior produtividade das algas é que nelas não há, como nas plantas, tecidos não-produtivos, isto é, que não fazem fotossíntese, como madeira, fibras etc. Por ser curto, o ciclo de vida das algas possibilita que a quantidade de energia por elas absorvida seja rapidamente liberada pela morte e decomposição dos indivíduos, sem haver acúmulo de biomassa. Por outro lado, em uma floresta, grande parte da energia absorvida na fotossíntese fica armazenada na madeira das árvores, constituindo uma biomassa improdutiva e de longa duração. **(Fig. 14.7)**

▲ **Figura 14.7** • **A.** Pirâmide que mostra a relação entre energia e produtividade. A produtividade primária líquida é relativamente maior nos ecossistemas marinhos que nos de terra firme, porque os produtores do fitoplâncton (**B**) têm crescimento rápido e acumulam pouca matéria orgânica em seus corpos. Em uma floresta (**C**) ocorre o inverso: as árvores crescem lentamente e acumulam muita matéria orgânica em seus troncos.

Produtividade secundária

Produtividade secundária líquida (PSL) refere-se à quantidade de matéria orgânica armazenada no corpo de um animal herbívoro em determinado intervalo de tempo; ela corresponde à energia que o herbívoro conseguiu absorver dos alimentos que ingeriu, já subtraído o que foi gasto para manter seu metabolismo.

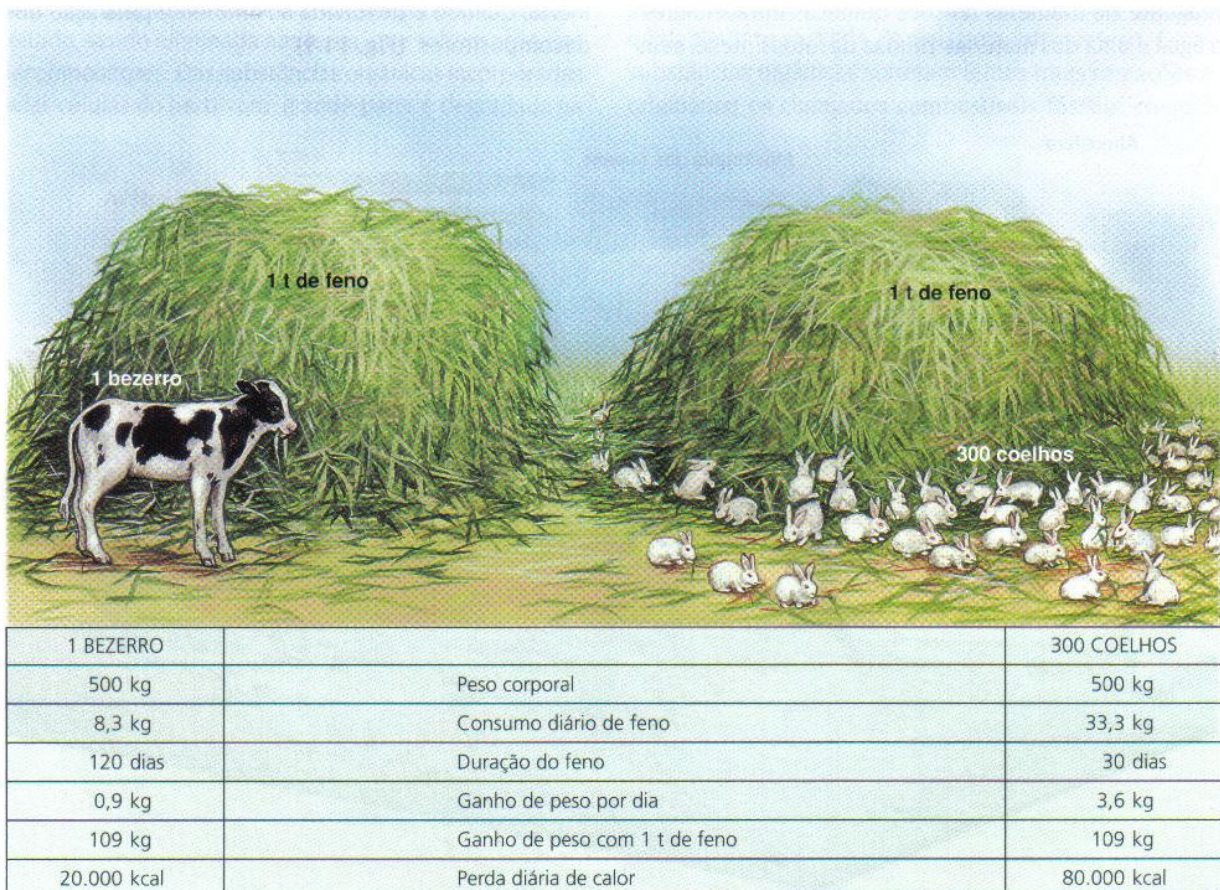
Por exemplo, com uma tonelada de alfafa pode-se alimentar um bezerro ou trezentos coelhos. A quantidade de carne produzida a partir dessa alfafa será a mesma, mas os coelhos estarão prontos para o abate em 30 dias, enquanto o bezerro precisará de 120 dias. Portanto a PSL dos coelhos é quatro vezes maior que a dos bezerros. **(Fig. 14.8)**

14.2 Ciclos biogeoquímicos

Com a morte dos organismos ou perda de partes de seu corpo, a matéria orgânica é degradada, e os átomos que a constituíam retornam ao ambiente, onde poderão ser incorporados por outros seres vivos. Uma vez que os átomos dos diversos elementos químicos que faziam parte de seres vivos voltam ao ambiente não-vivo, fala-se em **ciclos biogeoquímicos** (do grego *bios*, vida, e *geo*, Terra), para se ressaltar o fato de que os elementos químicos circulam entre os seres vivos (biosfera) e o planeta (atmosfera, hidrosfera e litosfera).

Se não houvesse esse reaproveitamento dos componentes da matéria dos cadáveres, átomos de alguns dos elementos químicos fundamentais para a constituição de novos seres vivos poderiam se esgotar. Considerando esse aspecto, a vida está continuamente sendo recriada a partir dos mesmos átomos.

O processo de reciclagem dos átomos na natureza é realizado principalmente por certos fungos e bactérias decompositores. Nutrindo-se dos cadáveres e das fezes dos mais diversos seres vivos, os decompositores promovem a degradação destes, transformando as moléculas de suas substâncias orgânicas em moléculas mais simples, que passam para o ambiente não-vivo e podem ser reutilizadas por outros seres como matéria-prima para a produção de suas substâncias orgânicas.

1 BEZERRO		300 COELHOS
500 kg	Peso corporal	500 kg
8,3 kg	Consumo diário de feno	33,3 kg
120 dias	Duração do feno	30 dias
0,9 kg	Ganho de peso por dia	3,6 kg
109 kg	Ganho de peso com 1 t de feno	109 kg
20.000 kcal	Perda diária de calor	80.000 kcal

▲ **Figura 14.8** • A produtividade secundária líquida (PSL) de coelhos é cerca de quatro vezes maior que a do gado bovino. O cálculo de produtividade leva em conta que, com a mesma quantidade de alimento, coelhos ficam prontos para o abate em um quarto do tempo que é necessário ao gado. (Fonte: J. Philipson, *Ecologia energética*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1977.)

Ciclo da água

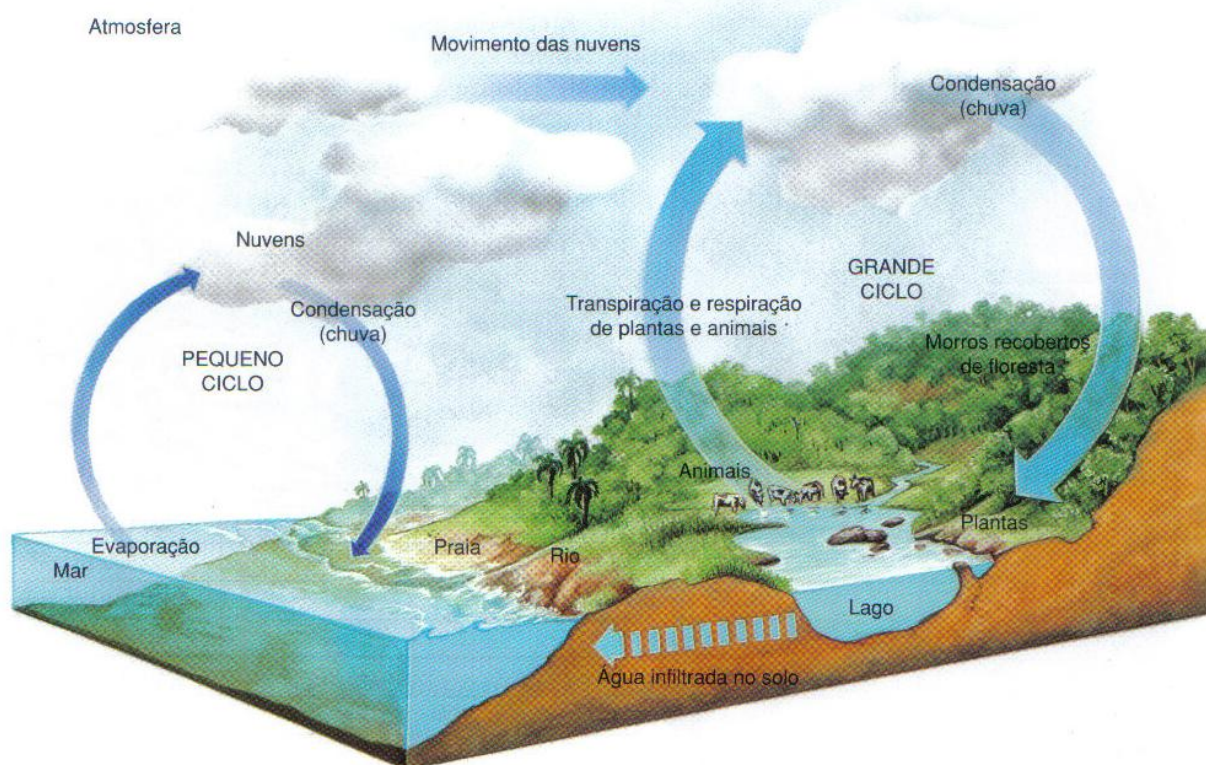
Embora a água não seja formada por um elemento químico e sim por moléculas que contêm átomos de hidrogênio e oxigênio, o **ciclo da água** é importante porque essa substância está intimamente associada aos processos metabólicos de todos os seres vivos. O ciclo da água pode ser considerado sob dois aspectos: o pequeno ciclo, ou ciclo curto, e o grande ciclo, ou ciclo longo.

O **pequeno ciclo da água** é o ciclo das chuvas. Nele, a água dos oceanos, lagos, rios, geleiras e mesmo a embebida no solo evapora, passando à forma gasosa. Nas camadas mais altas da atmosfera, o vapor d'água condensa-se e origina nuvens, a partir das quais retorna à crosta terrestre na forma de chuva. O ciclo das chuvas contribuiu no passado e ainda contribui para tornar o clima da Terra favorável à vida.

O **grande ciclo da água** é aquele do qual participam os seres vivos. Em um ecossistema de terra firme, por exemplo, as plantas absorvem, por meio de suas raízes, a água infiltrada no solo. Além de ser solvente e reagente de inúmeras reações químicas intracelulares, a água é uma das matérias-primas da fotossíntese; seus átomos de hidrogênio fazem parte dos glicídios produzidos, e seus átomos de oxigênio unem-se dois a dois, formando o gás oxigênio (O_2) liberado para a atmosfera. Na respiração, as plantas degradam as moléculas orgânicas que elas mesmas fabricaram, obtendo energia e liberando gás carbônico e água.

As plantas perdem água continuamente por transpiração, principalmente durante o dia, quando seus estômatos estão abertos. A transpiração é essencial para que a água absorvida pelas raízes seja conduzida até as folhas, nas quais ocorre a fotossíntese. A liberação da água na forma de vapor pelos estômatos, além de resfriar a planta, contribui para a manutenção de um grau de umidade do ar favorável à vida.

A água também participa de inúmeros processos do metabolismo animal. Animais obtêm água bebendo-a ou ingerindo-a em alimentos frescos; por outro lado, estão continuamente perdendo água do corpo na urina, nas fezes e por meio da transpiração.

Parte da água que as plantas e os animais absorvem é utilizada na síntese de outras substâncias, ficando incorporada nos tecidos animais ou vegetais até sua morte, quando é devolvida ao ambiente pela ação dos decompositores. **(Fig. 14.9)**

▲ **Figura 14.9** • Representação esquemática do ciclo da água na natureza. O ciclo curto é o das chuvas; o longo, aquele de que participam os seres vivos. As plantas absorvem a água infiltrada no solo e, pela transpiração, a eliminam na forma de vapor, proporcionando umidade ao ar e criando, assim, microclimas favoráveis à manutenção da vida.

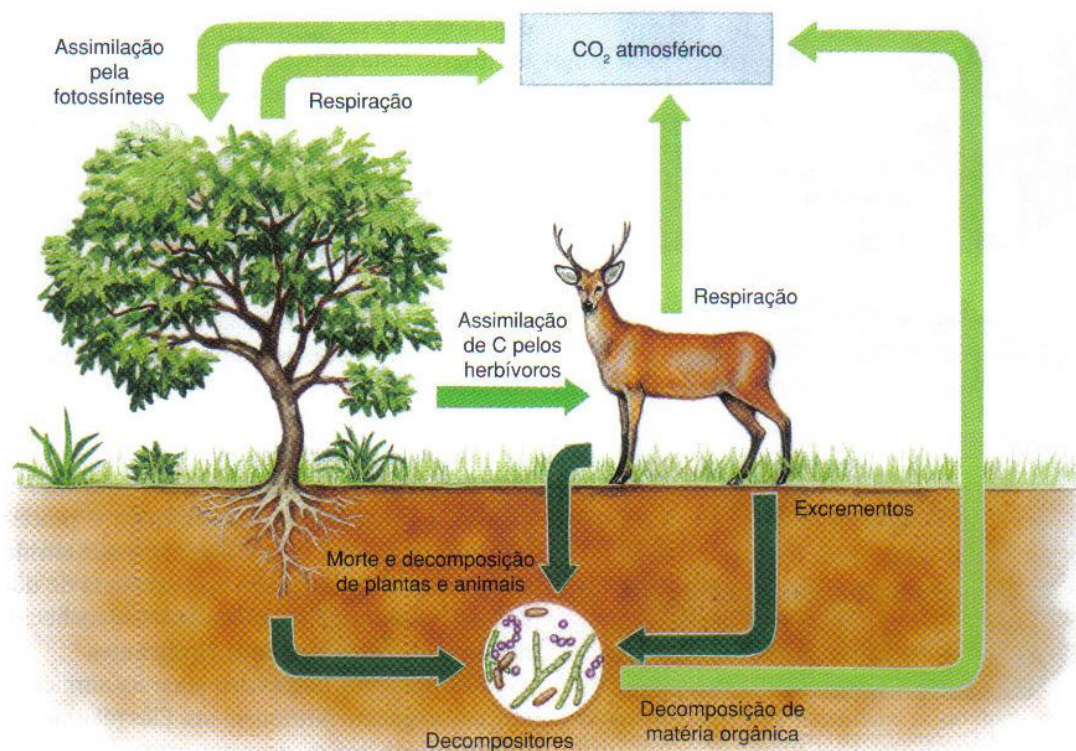
Ciclo do carbono

O **ciclo do carbono** consiste na passagem de átomos de carbono (C) presentes nas moléculas de gás carbônico (CO_2) disponíveis no ecossistema para moléculas que constituem as substâncias orgânicas dos seres vivos (proteínas, glicídios, lipídios etc.), e vice-versa. O gás carbônico é captado pelos organismos fotossintetizantes e seus átomos são utilizados na síntese de moléculas orgânicas, cujo constituinte fundamental é o carbono.

Como já mencionamos, parte substancial das moléculas orgânicas produzidas na fotossíntese é degradada pelo próprio organismo fotossintetizante em sua respiração celular, para a obtenção da energia necessária ao metabolismo. Nesse processo, o carbono é devolvido ao ambiente na forma de CO_2. O restante da matéria orgânica produzida na fotossíntese passa a constituir a biomassa dos produtores. O carbono constituinte da biomassa pode ter dois destinos: ser transferido aos animais herbívoros ou ser restituído ao ambiente na forma de CO_2, com a morte do organismo produtor e a degradação de sua matéria orgânica pelos decompositores.

Nos herbívoros, como vimos no item 14.1, a maior parte da energia contida no alimento ingerido não é aproveitada, sendo eliminada nas fezes, que sofrem ação dos decompositores. Das substâncias orgânicas incorporadas pelas células do herbívoro, grande parte é degradada na respiração celular para fornecer energia metabólica; nessa degradação, o carbono é liberado na forma de CO_2. A outra parte das substâncias alimentares originalmente obtida dos produtores é utilizada na síntese das substâncias orgânicas do herbívoro, passando a constituir sua biomassa. Esta poderá ser transferida a um carnívoro ou decomposta pelos decompositores. Assim, o carbono captado na fotossíntese vai passando de um nível trófico para outro e, ao mesmo tempo, retornando aos poucos à atmosfera, como resultado da respiração dos próprios organismos e da ação dos decompositores, que atuam em todos os níveis tróficos. **(Fig. 14.10)**

Combustíveis fósseis

Em certas condições ocorridas no passado, restos e cadáveres de grande quantidade de organismos de diversos níveis tróficos (microrganismos, plâncton, animais etc.) ficaram a salvo da decomposição, geralmente por terem sido rapidamente sepultados no fundo do mar, sob depósitos de sedimentos que depois se tornaram rochas. Os resíduos orgânicos desses seres soterrados tiveram suas moléculas preservadas da ação dos decompositores, nelas mantendo a energia potencial química originalmente captada do Sol, pela fotossíntese. Essas substâncias orgânicas sofreram lentas transformações e originaram os chamados **combustíveis fósseis**, como o

▲ **Figura 14.10** • Representação esquemática do ciclo do carbono. Aqui estão representados apenas os níveis dos produtores e dos herbívoros. A passagem do carbono para os demais níveis tróficos ocorre de maneira semelhante.

carvão mineral, o gás natural e o petróleo. A energia contida nas moléculas que formam esses combustíveis foi, portanto, originalmente captada da luz solar por meio da fotossíntese, milhões de anos atrás. **(Fig. 14.11)**

A utilização de combustíveis fósseis pela espécie humana tem restituído à atmosfera, na forma de CO_2, átomos de carbono que ficaram fora de circulação durante milhões de anos. Devido à queima desses combustíveis, a concentração de gás carbônico na atmosfera aumentou, nos últimos 100 anos, de 0,029% para quase 0,04%. Embora possa parecer insignificante, esse aumento representa, em termos proporcionais, quase 40%. De acordo com muitos cientistas, o aumento do teor de CO_2 na atmosfera está provocando a elevação da temperatura média da Terra, em decorrência do aumento do efeito estufa (esse efeito será estudado no capítulo 18).

▲ **Figura 14.11** • **A.** Os combustíveis fósseis formaram-se de restos orgânicos de seres que viveram no passado e que escaparam da ação dos decompositores. **B.** Após permanecerem milhões de anos sob pressão entre as camadas de rocha, os restos orgânicos originam as substâncias constituintes do petróleo e do gás natural (metano).

Ciclo do nitrogênio

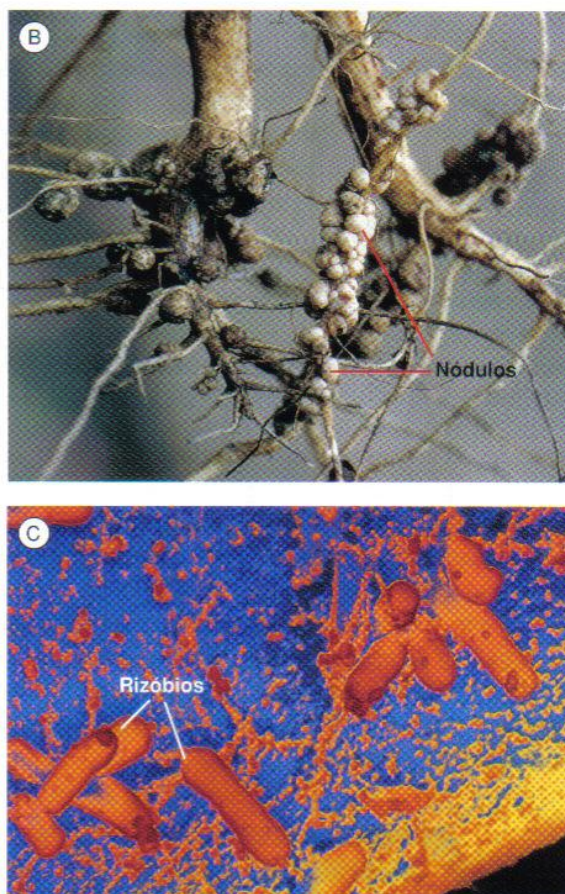
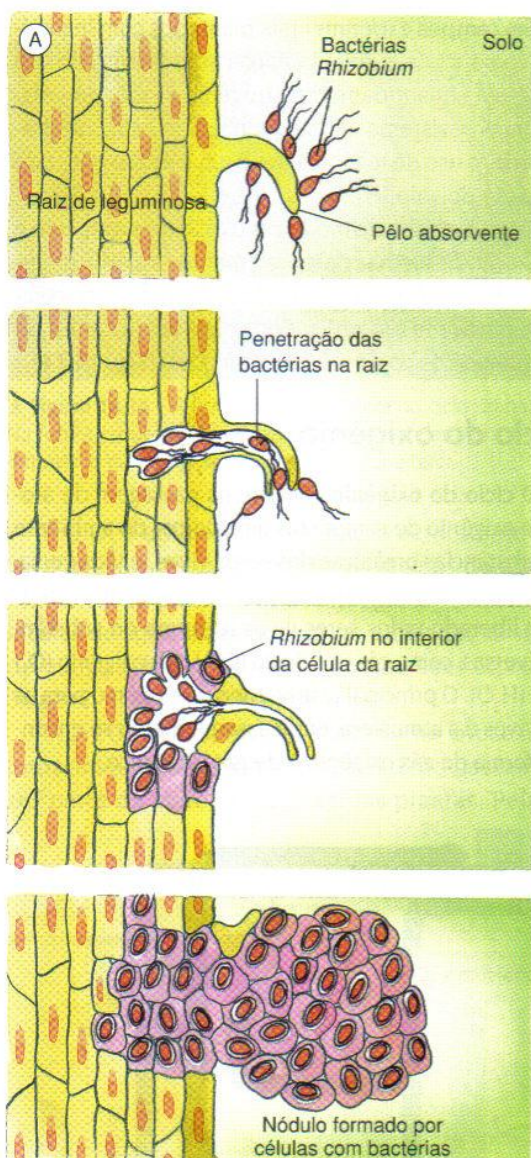
O **ciclo do nitrogênio** consiste na passagem de átomos de nitrogênio de substâncias inorgânicas do meio físico para moléculas orgânicas constituintes dos seres vivos, e vice-versa. Átomos de nitrogênio fazem parte de duas classes importantes de substâncias orgânicas: as proteínas e os ácidos nucléicos.

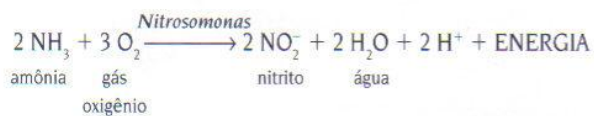
O maior reservatório de nitrogênio do planeta é a atmosfera, onde esse elemento químico se encontra na forma de gás nitrogênio ou nitrogênio molecular (N_2), perfazendo cerca de 79% do volume do ar atmosférico. A grande maioria dos seres vivos, entretanto, não consegue utilizar nitrogênio na forma molecular (N_2) e, por isso, depende de umas poucas espécies de bactéria, conhecidas genericamente como **bactérias fixadoras de nitrogênio**, capazes de utilizar diretamente o N_2, incorporando os átomos de nitrogênio em suas moléculas orgânicas. Essa incorporação é denominada **fixação do nitrogênio**.

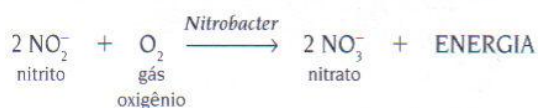
Fixação do nitrogênio e nitrificação

Algumas bactérias de vida livre, entre elas as cianobactérias, fixam nitrogênio da atmosfera. Outras bactérias fixadoras de nitrogênio, no entanto, vivem no interior de células de organismos eucarióticos. Esse é o caso das bactérias do gênero *Rhizobium* (rizóbios), que vivem associadas às raízes de plantas leguminosas (feijão, soja, ervilha etc.). Essas bactérias invadem as raízes de plantas jovens, instalando-se e reproduzindo-se no interior de suas células. As bactérias estimulam a multiplicação das células infectadas, o que leva à formação de tumores, denominados **nódulos**. Graças à associação com os rizóbios, as plantas leguminosas podem viver em solos pobres em compostos nitrogenados, nos quais outras plantas não se desenvolvem bem. Os rizóbios, por sua vez, também se beneficiam com a associação, pois utilizam como alimento substâncias orgânicas fabricadas pela planta. Ao morrer e se decompor, as plantas leguminosas liberam, em forma de amônia (NH_3), o nitrogênio de suas moléculas orgânicas, fertilizando o solo. **(Fig. 14.12)**

Algumas plantas conseguem aproveitar diretamente a amônia, mas o composto nitrogenado mais empregado pelos vegetais é o **nitrato** (NO_3^-). O processo de formação de nitratos no solo é denominado **nitrificação**, e sua ocorrência dá-se pela ação conjunta de dois grupos de bactérias quimiossintetizantes, conhecidas genericamente como **bactérias nitrificantes**.

As primeiras bactérias a atuar na nitrificação pertencem ao gênero *Nitrosomonas*. Elas realizam a oxidação da amônia, processo em que essa substância se combina com moléculas de gás oxigênio, produzindo o ânion **nitrito** (NO_2^-). Essa reação libera energia, utilizada pela bactéria em seu metabolismo.

▲ **Figura 14.12** • **A.** Representação de uma raiz de leguminosa sendo infectada por bactérias do gênero *Rhizobium*. Os rizóbios penetram nas raízes da planta por meio dos pêlos absorventes. Depois, nas células mais internas das raízes, induzem a multiplicação celular, o que leva à formação de nódulos. **B.** Nódulos na raiz de uma espécie de feijão. **C.** Fotomicrografia obtida em microscópio eletrônico de varredura e colorizada artificialmente de bactérias *Rhizobium leguminosarum* (aumento ≃ 15.000 ×).

$$\underset{\text{amônia}}{2\,NH_3} + \underset{\text{gás oxigênio}}{3\,O_2} \xrightarrow{\textit{Nitrosomonas}} \underset{\text{nitrito}}{2\,NO_2^-} + \underset{\text{água}}{2\,H_2O} + 2\,H^+ + \text{ENERGIA}$$

O nitrito é tóxico para as plantas, mas raramente se acumula no solo por muito tempo, pois é imediatamente oxidado por bactérias do gênero *Nitrobacter*, que o transformam em nitratos. Essa reação também libera energia, utilizada pelas bactérias em seu metabolismo.

$$\underset{\text{nitrito}}{2\,NO_2^-} + \underset{\text{gás oxigênio}}{O_2} \xrightarrow{\textit{Nitrobacter}} \underset{\text{nitrato}}{2\,NO_3^-} + \text{ENERGIA}$$

Compostos que liberam nitratos são altamente solúveis em água, o que facilita sua assimilação pelas plantas; estas absorvem os nitratos dissolvidos na água que penetra nos pêlos absorventes das raízes. O nitrogênio que compõe o nitrato passa a fazer parte de moléculas orgânicas vegetais, principalmente proteínas e ácidos nucléicos. Quando as plantas são comidas por herbívoros, as substâncias orgânicas nitrogenadas são utilizadas para a constituição das moléculas animais. O mesmo ocorre nos níveis tróficos superiores das cadeias alimentares.

A degradação de proteínas e de ácidos nucléicos que ocorre no metabolismo animal produz compostos nitrogenados denominados genericamente **excreções**, ou **excretas**, como amônia, uréia e ácido úrico, que são eliminados no ambiente. Pela ação de decompositores em plantas e animais mortos, o nitrogênio constituinte das moléculas orgânicas retorna ao solo na forma de amônia e pode passar novamente por processos de nitrificação.

Desnitrificação

Enquanto uma parte dos compostos nitrogenados presentes no solo sofre nitrificação, outra sofre **desnitrificação**, processo realizado por bactérias do solo, denominadas genericamente **bactérias desnitrificantes**. Estas, para obter energia, degradam compostos nitrogenados liberando gás nitrogênio (N_2), que retorna à atmosfera. **(Fig. 14.13)**

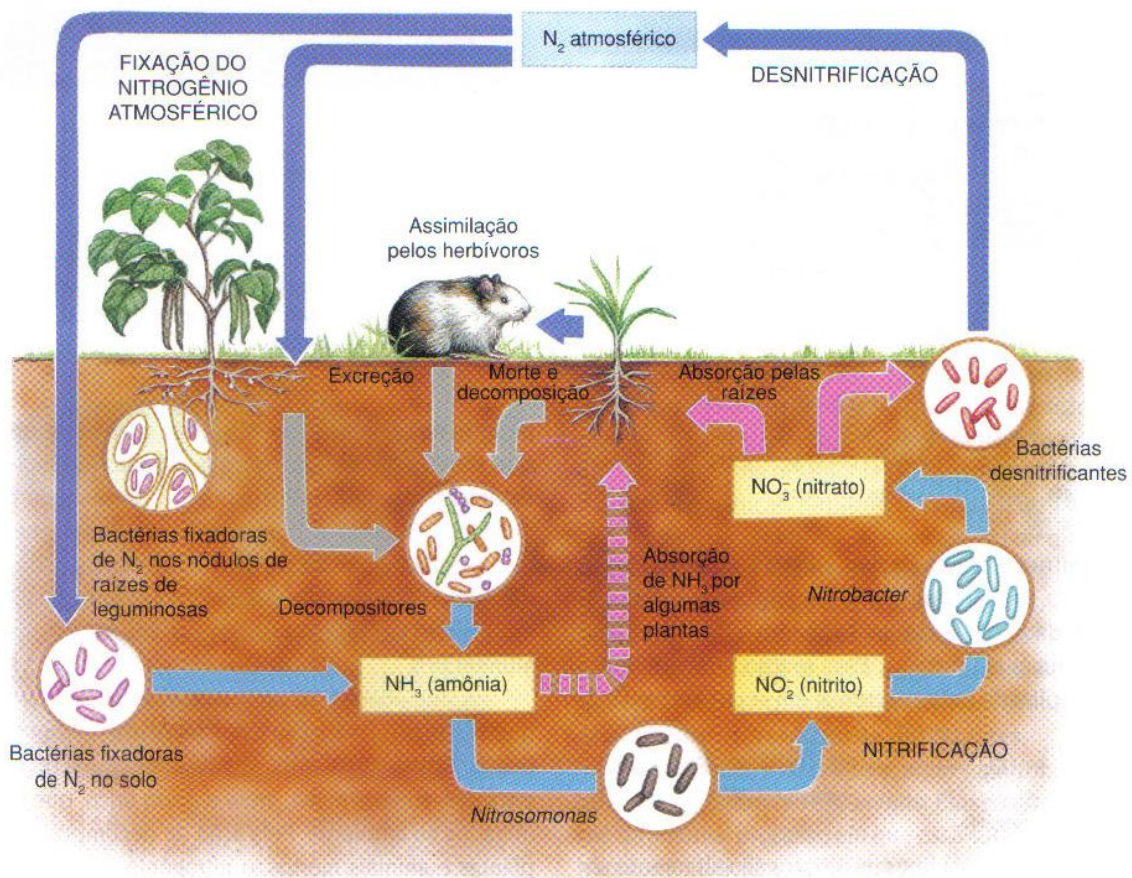
Adubação verde

Os agricultores interferem deliberadamente no ciclo do nitrogênio com o objetivo de obter maior produtividade em suas culturas. Uma das maneiras de aumentar a quantidade de nitrogênio disponível no solo é por meio do cultivo de plantas leguminosas, como soja, alfafa, feijão, ervilha etc., que abrigam em suas raízes bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium*. As leguminosas podem ser plantadas tanto junto com plantas não-leguminosas, nas chamadas **plantações consorciadas**, como em períodos alternados com o cultivo de outras plantas, processo chamado de **rotação de culturas**.

Em campos experimentais plantados com leguminosas como alfafa e soja, verificou-se aumento de até 100 vezes na quantidade de nitrogênio fixado, em relação a um ecossistema natural. Conhecido como **adubação verde**, o uso de leguminosas é um método eficaz de fertilização do solo.

Outra maneira de modificar o ciclo do nitrogênio é pela fixação industrial desse elemento, a partir da atmosfera. Esse processo é utilizado na fabricação de compostos nitrogenados utilizados como fertilizantes do solo, conhecidos como adubos químicos. **(Fig. 14.14)**

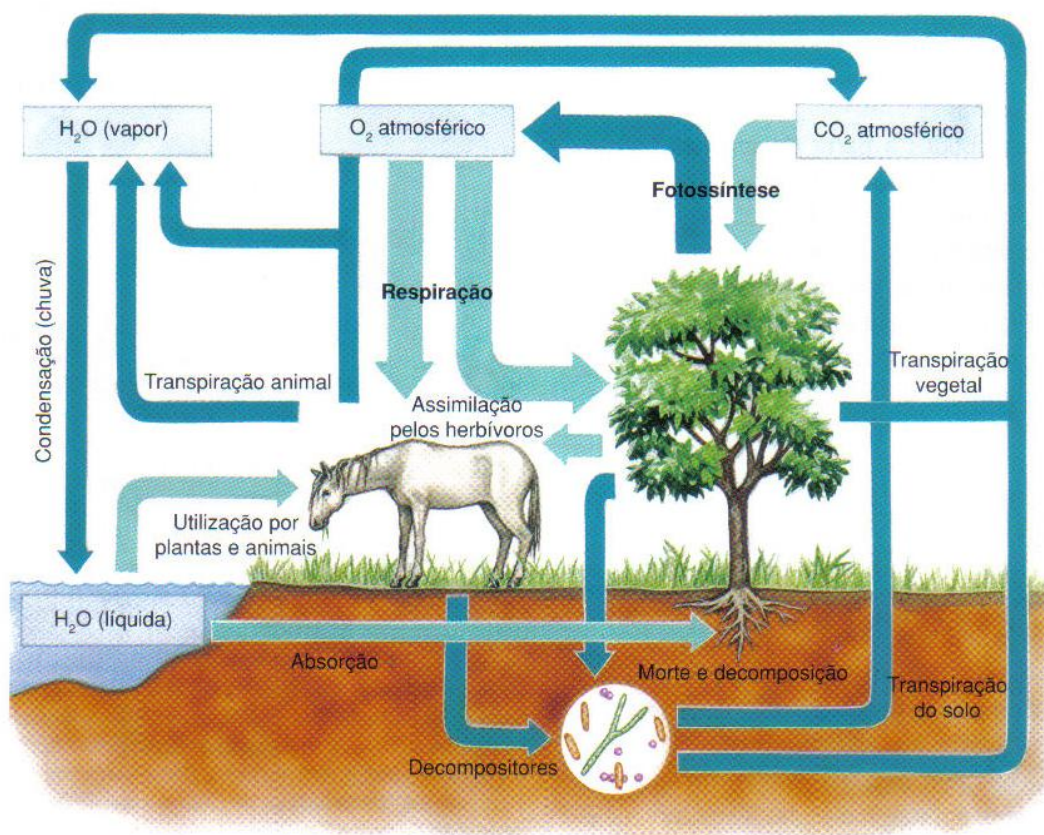
Ciclo do oxigênio

O **ciclo do oxigênio** consiste na passagem de átomos de oxigênio de compostos inorgânicos do ambiente para substâncias orgânicas dos seres vivos, e vice-versa. Trata-se de um ciclo complexo, pois o oxigênio (O) é utilizado e liberado pelos seres vivos na forma de substâncias diversas, como gás carbônico (CO_2), gás oxigênio (O_2) e água (H_2O). O principal reservatório de oxigênio para os seres vivos é a atmosfera, onde esse elemento se encontra na forma de gás oxigênio e de gás carbônico.

▲ **Figura 14.13** • Representação esquemática do ciclo do nitrogênio.

▲ **Figura 14.14** • A humanidade interfere no ciclo do nitrogênio com o fim de aumentar a produção agrícola. Na foto à esquerda, consórcio de culturas de laranja e feijão. Os adubos químicos contêm, entre outros elementos, nitrogênio na forma de nitratos (foto à direita).

O O_2 é utilizado na respiração aeróbica de plantas e animais. Nesse processo, os átomos de oxigênio combinam-se com átomos de hidrogênio, formando moléculas de água. Estas podem ser utilizadas na síntese de outras substâncias, de modo que seus átomos de oxigênio ficam fazendo parte delas.

O CO_2 atmosférico é utilizado no processo de fotossíntese e seus átomos de oxigênio passam a fazer parte da matéria orgânica das plantas. Pela respiração celular, e também pela decomposição dessa matéria orgânica, o oxigênio é restituído à atmosfera, fazendo parte de moléculas de água e de gás carbônico.

Assim, gás oxigênio, gás carbônico e água, que constituem as três principais fontes inorgânicas de átomos de oxigênio para os seres vivos, estão constantemente trocando átomos entre si, durante os processos metabólicos da biosfera. **(Fig. 14.15)**

▲ **Figura 14.15** • Representação esquemática do ciclo do oxigênio. Foram representadas apenas algumas das mais importantes vias de utilização e liberação desse elemento.

QUADRO 14.1 • A camada de ozônio que protege a Terra

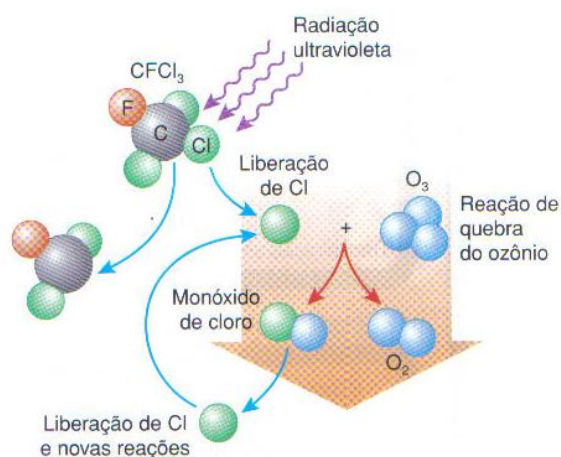
Nas camadas mais altas da atmosfera, uma das formas de radiação ultravioleta emitida pelo Sol (ultravioleta curta) causa a ruptura de uma certa quantidade de moléculas de gás oxigênio (O_2), com liberação de átomos isolados, que imediatamente reagem com moléculas de gás oxigênio, formando o gás **ozônio** (**O_3**). Essa reação ocorre a altitudes entre 20 km e 40 km acima do nível do mar. **(Fig. 14.16)**

▲ **Figura 14.16** • Na reação de formação de ozônio, além de O_2 e de oxigênio atômico, há um terceiro participante, genericamente chamado "terceiro corpo" (T), que age como catalisador. O terceiro corpo pode ser tanto uma molécula de óxido nitroso (NO_2) como uma outra molécula de O_2.

O ozônio forma, na alta atmosfera, uma camada que constitui um escudo protetor contra a penetração de um tipo de radiação ultravioleta do Sol, a ultravioleta longa, muito prejudicial aos seres vivos. Se essa radiação ultravioleta atingisse livremente a superfície do planeta, muitos dos organismos atuais morreriam. A radiação ultravioleta longa aumenta significativamente a taxa de mutação dos genes, por isso é um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de câncer de pele na espécie humana.

Dados obtidos a partir de satélites orbitais mostram que, sobre o continente Antártico, no Pólo Sul, há uma grande área em que a camada de ozônio está anormalmente rarefeita, formando um verdadeiro "buraco". Em certas épocas do ano (setembro e outubro), a área desse "buraco" aumenta, e há maior passagem de radiação ultravioleta, que mata grande quantidade de plâncton fotossintetizante, afetando toda a vida animal da região.

A principal causa da destruição da camada de ozônio é a liberação, na atmosfera, de gases do grupo dos clorofluorcarbonos, abreviadamente chamados de CFCs. Os CFCs são gases sintéticos (isto é, produzidos em laboratórios e indústrias), utilizados em aerossóis, em compressores de geladeiras e liberados durante a fabricação de certos tipos de plástico utilizados em embalagens. Os CFCs acumulam-se nas altas camadas da atmosfera, onde o cloro presente em suas moléculas reage com moléculas de ozônio, quebrando-as. **(Fig. 14.17)**

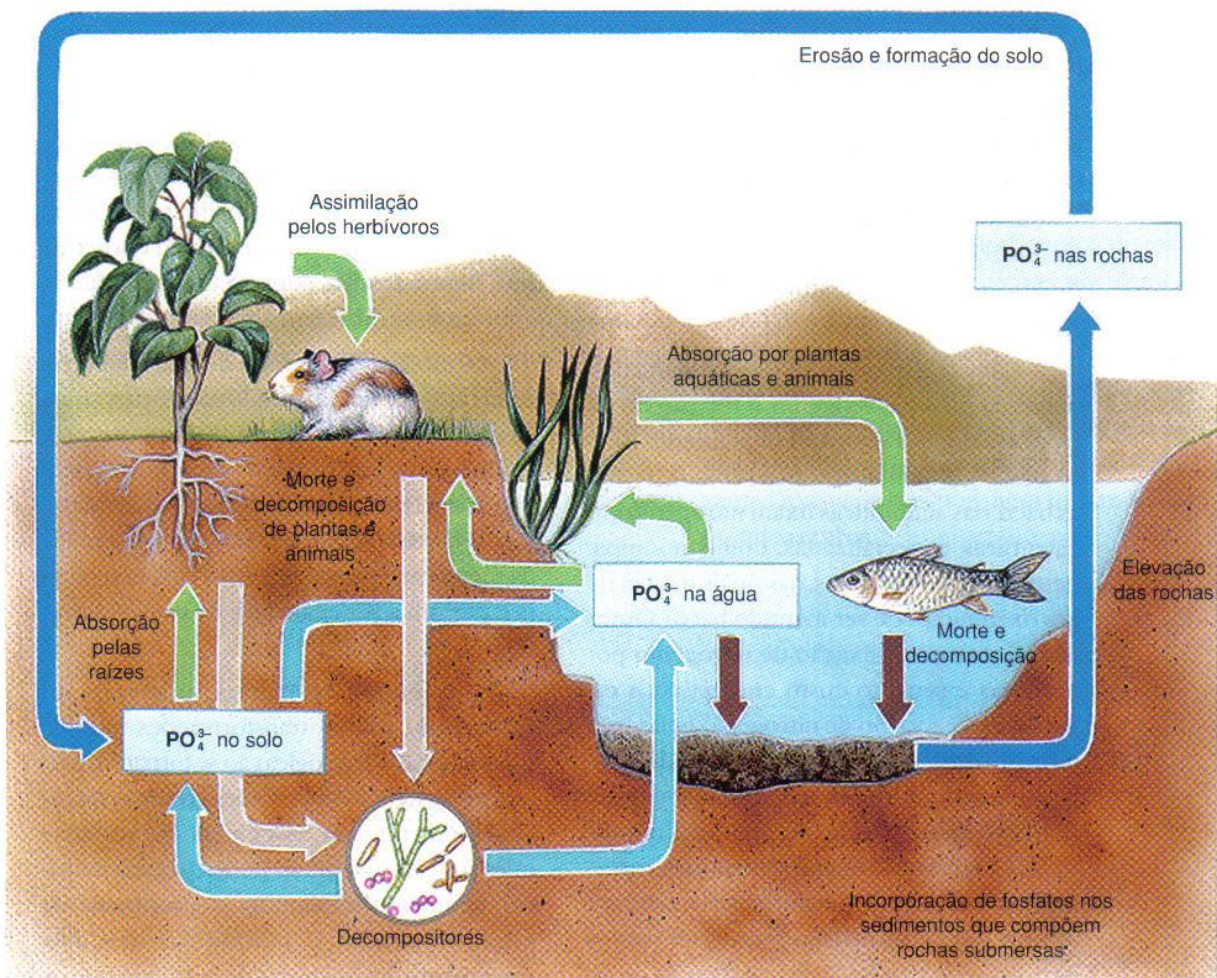
O ozônio também pode se formar em baixas altitudes. Nesse caso, ele é poluente e pode causar problemas respiratórios nas pessoas. A produção de ozônio em baixas altitudes é causada pelo aumento de certos gases poluentes, como óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e peróxidos de hidrogênio.

▲ **Figura 14.17** • A radiação ultravioleta, responsável pela fabricação de ozônio, também pode destruir esse gás, se houver CFCs na atmosfera. Sob a ação da radiação ultravioleta, as moléculas de CFC quebram-se e libertam átomos de cloro, que se combinam com o ozônio formando gás oxigênio e monóxido de cloro. Como este composto é instável, ele liberta átomos de cloro e a reação de destruição do ozônio se amplia. Calcula-se que uma única molécula de CFC pode destruir 100 mil moléculas de ozônio.

Ciclo do fósforo

Além da água, do carbono (C), do nitrogênio (N) e do oxigênio (O), também o fósforo (P) é importante para os seres vivos. Átomos desse elemento fazem parte, por exemplo, do material hereditário e das moléculas energéticas de ATP.

Em certos aspectos, o **ciclo do fósforo** é mais simples que os ciclos do carbono e do nitrogênio, pois, como não há muitos compostos gasosos de fósforo, não há passagem de átomos desse elemento pela atmosfera. Outra razão para a simplicidade do ciclo do fósforo é a existência de apenas um composto de fósforo realmente importante para os seres vivos: o **íon fosfato** (PO_4^{3-}). As plantas obtêm fósforo do ambiente ao absorver fosfatos dissolvidos na água e no solo. Os animais obtêm fosfatos na água e no alimento.

Os processos de decomposição da matéria orgânica devolvem o fósforo ao solo ou à água. Daí, parte dele é levada pelas chuvas para os lagos e mares, onde acaba se incorporando às rochas. Nesse caso, o fósforo só retorna aos ecossistemas bem mais tarde, quando essas rochas se elevam em conseqüência de processos geológicos e, na superfície, são decompostas e transformadas em solo.

Assim, no ciclo do fósforo distinguem-se dois aspectos, relacionados a escalas de tempo bem diferentes. Uma parte dos átomos do fósforo é reciclada localmente, entre o solo, plantas, consumidores e decompositores, em um tempo relativamente curto, que podemos chamar de **ciclo de tempo ecológico**. Outra parte do fósforo ambiental é sedimentada e incorporada às rochas; seu ciclo envolve um tempo muito mais longo; por isso, pode ser chamado de **ciclo de tempo geológico**. **(Fig. 14.18)**

▲ **Figura 14.18** • Representação do ciclo do fósforo.

LEITURA

BACTÉRIAS SIMBIÓTICAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO

[...] Bactérias fixadoras de nitrogênio freqüentemente estabelecem relações mutualísticas com plantas. Essas bactérias contêm um complexo enzimático, conhecido como nitrogenase, que catalisa reações envolvendo N_2, íons hidrogênio e elétrons livres, com formação de amônia (NH_3). Para que essas reações ocorram, as bactérias necessitam de compostos ricos em energia (ATP) e de elétrons, obtidos a partir da respiração celular de açúcares fornecidos pela planta.

As diversas condições necessárias para a fixação de nitrogênio pelas bactérias são: 1) acesso ao nitrogênio atmosférico; 2) complexo enzimático da nitrogenase; 3) grande quantidade de ATP; 4) ambiente anaeróbico; 5) suprimento de ferro, magnésio e molibdênio; 6) temperatura abaixo de 30 °C; [...].

Como a nitrogenase é prontamente desnaturada pelo gás oxigênio, a fixação de nitrogênio precisa ocorrer em ambiente isento desse gás [ambiente anaeróbico]. Assim, as bactérias simbióticas fixam nitrogênio em estruturas especializadas, como nódulos, heterocistos e vesículas, nas quais o nível de gás oxigênio pode ser mantido baixo. Outro fator limitante da fixação de nitrogênio por bactérias é seu alto custo energético. A capacidade de fixação de nitrogênio pelas bactérias é, em grande parte, controlada pelo hospedeiro, porque este pode regular o quanto de energia, em forma de açúcares, o organismo simbiótico recebe. Em alguns casos, até cerca de 30% do produto da fotossíntese de uma planta hospedeira podem ser usados para garantir a assimilação e a fixação de nitrogênio.

O hospedeiro inibe as enzimas assimiladoras de amônia da bactéria, o que força o microrganismo a excretar a maior parte do nitrogênio fixado na forma de amônia. As células hospedeiras têm enzimas que convertem a amônia excretada pelas bactérias em compostos úteis para si. Essas adaptações estão presentes nas associações *Rhizobium*-plantas leguminosas e *Anabaena-Azolla*. [...] [*Anabaena* é uma cianobactéria; *Azolla* é uma pteridófita aquática.]

A infecção de uma leguminosa ocorre pelo ataque dos rizóbios aos pêlos absorventes recém-formados da planta. [...] As bactérias atravessam a parede celulósica e entram em contato com a membrana plasmática. A célula reage formando uma estrutura tubular que cresce para dentro do córtex da raiz. Essa estrutura contém uma substância gelatinosa, na qual os rizóbios se multiplicam.

À medida que o tubo de infecção cresce no interior da raiz, células do córtex situadas próximo passam a se multiplicar, provavelmente estimuladas por moléculas indutoras (fator *nod*) liberadas pelas bactérias. Estas são, então, envoltas por projeções da membrana plasmática das células da planta e passam a ser chamadas de bacterióides. [...]

As células de muitas linhagens de *Rhizobium* sofrem transformações radicais morfológicas e fisiológicas ao se tornarem bacterióides. Alguns bacterióides crescem até 40 vezes em relação às células bacterianas infectantes; seu número pode chegar a milhares, ocupando totalmente o citoplasma da célula hospedeira. [...] Os bacterióides, diferentemente das bactérias de vida livre que os originam, não têm mobilidade. Sua finíssima

parede permite a entrada de nutrientes da célula vegetal e a saída para ela de amônia. A transformação dos bastonetes bacterianos em bacterióides no interior da célula da leguminosa inicia o processo de fixação do nitrogênio. Os bacterióides comportam-se como se fossem organelas fixadoras de nitrogênio da célula hospedeira. Mas [com suas enzimas inibidas pela bactéria] eles não podem utilizar o nitrogênio que fixam, dependendo da planta para obter compostos orgânicos, inclusive os nitrogenados.

Os nódulos das raízes das leguminosas contêm grande quantidade de um pigmento vermelho de natureza protéica, chamado de leg-hemoglobina. Essa substância localiza-se no citoplasma das células da planta e só se forma após a associação simbiótica ter-se estabelecido. A leg-hemoglobina captura moléculas de gás oxigênio, mantendo-o em baixa concentração na célula. A nitrogenase é inativada em altas concentrações de O_2. A leg-hemoglobina tem estrutura e função semelhantes à hemoglobina presente nas hemácias dos vertebrados.

Os nódulos têm tempo de existência limitado; apenas os que funcionam no máximo de sua capacidade são mantidos pela planta. Quando a atividade de um nódulo declina, bactérias ainda presentes no tubo de infecção e os bacterióides das células do nódulo são liberados para o solo e podem reinfectar outros pêlos absorventes.

O mutualismo entre *Rhizobium* e plantas leguminosas é determinado por diversos genes, entre os quais os chamados complexos *nod* e *fix*, que controlam a formação do nódulo e a fixação do nitrogênio, respectivamente. Entre os genes *fix*, o mais significante é o gene *nif*, que codifica enzimas do complexo da nitrogenase. Na maioria das espécies de *Rhizobium*, esse gene localiza-se em um plasmídio chamado *pSym* (de simbiose), assim como os genes *nod*. [...] Além desses, diversos outros genes, tanto da bactéria quanto da planta, estão envolvidos na formação dos nódulos; mais de 50 deles já foram identificados pelos cientistas. [...]

Muitos aspectos da relação simbiótica entre o *Rhizobium* e as leguminosas ainda não estão completamente esclarecidos. As informações referem-se a poucas espécies, o que não é representativo da situação na natureza. As pesquisas sobre esse tipo de simbiose continuam por sua significância e importância [...]. A produção de alimentos para suprir a crescente população humana mundial requer novos suprimentos de fertilizantes, nos quais o nitrogênio é um elemento-chave. É mais econômico e mais saudável, em termos ecológicos, aumentar a produção de nitrogênio assimilável por meio de sistemas biológicos, como o do *Rhizobium* e das plantas leguminosas, do que produzir fertilizantes nitrogenados por meio de processos químicos caros.

• **Fonte:** Surindar Paracer e Vernon Ahmadjian, *Symbiosis*: an introduction tobiological associations. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1992. p.65-69. (*Tradução nossa*)

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

14.1 Fluxo de energia e níveis tróficos

1. O que significa dizer que o fluxo de energia nos ecossistemas é unidirecional?
2. O que ocorre na transferência entre níveis tróficos com a quantidade de energia disponível?
3. O que é biomassa?
4. O que são pirâmides de energia?
5. O que é uma pirâmide de números?
6. O que é produtividade primária bruta (PPB)? E produtividade primária líquida (PPL)? Por que estudos relativos à produtividade são importantes?
7. Por que é menos dispendioso produzir alimentos vegetais (como grãos, por exemplo) do que alimentos animais (como carne, por exemplo)?
8. Por que motivo a produtividade de um ecossistema marinho, em que os produtores são seres microscópicos do fitoplâncton, é maior que a de um ecossistema de terra firme, como uma floresta?
9. Conceitue produtividade secundária líquida (PSL), exemplificando.

14.2 Ciclos biogeoquímicos

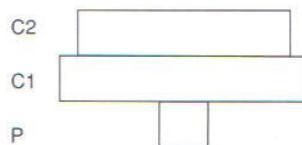
10. Conceitue ciclo biogeoquímico.
11. De que maneira os agentes decompositores atuam nos ciclos biogeoquímicos?
12. Compare resumidamente o pequeno e o grande ciclo da água na biosfera.
13. Em relação ao ciclo da água, faça uma tabela que contenha os seguintes itens: a) formas de obtenção de água por plantas e animais; b) principais funções da água no metabolismo vegetal e animal; c) formas pelas quais a água é devolvida ao ambiente por plantas e animais.
14. Em relação ao ciclo do carbono, faça uma tabela que contenha os seguintes itens: a) forma química em que o carbono está disponível no ambiente; b) formas de obtenção de carbono por plantas e animais; c) processos pelos quais o carbono orgânico é devolvido ao ambiente pelas plantas e animais.
15. O que são e como se formaram os combustíveis fósseis? Qual é a conseqüência da sua utilização pela humanidade?
16. O que é fixação do nitrogênio e como ela ocorre?
17. Quais são e onde vivem os principais organismos fixadores de nitrogênio dos ecossistemas de terra firme?
18. O que é nitrificação? Quais são e como atuam as bactérias que executam esse processo?
19. O que é desnitrificação e qual é o seu papel no ciclo do nitrogênio?
20. O que é adubação verde? Exemplique.
21. Em relação ao ciclo do nitrogênio, faça uma tabela que contenha os seguintes itens: a) forma química em que o nitrogênio está acumulado no ambiente; b) formas de obtenção de nitrogênio por plantas e animais; c) processos pelos quais o nitrogênio orgânico é devolvido ao ambiente por plantas e animais.
22. Quais são as três principais fontes não-vivas de oxigênio utilizadas pelos seres vivos? De que maneiras o oxigênio presente em um organismo vivo retorna ao ambiente?

Quadro 14.1 CAMADA DE OZÔNIO QUE PROTEGE A TERRA

23. Como se forma o gás ozônio na atmosfera?
24. Qual é a importância da camada de ozônio atmosférica para os seres vivos?
25. Qual é a principal causa da destruição parcial da camada de ozônio na atmosfera e quais são as conseqüências dessa destruição?
26. Em relação ao ciclo do fósforo na biosfera, responda:
    a) Qual é o papel desse elemento químico nos seres vivos e em que forma ele é utilizado?
    b) Por que existe um ciclo do fósforo de duração curta e um de duração longa?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

27. O desenho representa uma pirâmide ecológica, em que P = produtor, C1 = consumidor primário e C2 = consumidor secundário. Com certeza, essa é uma
    a) pirâmide de biomassa.
    b) pirâmide de energia.
    c) pirâmide de números.
    d) representação errada, pois não tem forma de pirâmide.

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 28 a 31.

a) Água.
b) Carbono.
c) Nitrogênio.
d) Oxigênio.

28. A formação de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, está diretamente relacionada ao ciclo de qual elemento químico?

29. Bactérias quimiossintetizantes capazes de transformar amônia em nitratos participam do ciclo de qual elemento químico?

30. A rotação de culturas e a plantação consorciada com leguminosas são processos relacionados diretamente ao ciclo de qual elemento químico?

31. A formação da camada de ozônio que protege a Terra da radiação ultravioleta está diretamente relacionada a qual elemento químico?

32. A capacidade que as leguminosas têm de enriquecer o solo com nitrogênio deve-se a bactérias
a) desnitrificantes que vivem no solo.
b) fixadoras de N_2 que vivem em suas raízes.
c) nitrificantes que vivem em suas folhas.
d) nitrificantes que vivem no solo.

QUESTÕES DISCURSIVAS

33. Imagine que um ecossistema perdesse seus decompositores. O que aconteceria com os ciclos biogeoquímicos?

34. Em 1 m^2 de floresta, foram encontrados os seguintes valores de biomassa para o conjunto de componentes de cada nível trófico:
a) nível primário (produtores) — 809 g
b) nível secundário (consumidores primários) — 37 g
c) nível terciário (consumidores secundários) — 11 g
d) nível quaternário (consumidores terciários) — 1,5 g

Construa a pirâmide da biomassa para essa comunidade utilizando uma escala apropriada.

35. Foram calculados os valores de biomassa dos componentes de três níveis tróficos de dois ecossistemas, um terrestre e um aquático. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Níveis tróficos	Ecossistema	
	Terrestre	Aquático
Biomassa dos produtores (seres fotossintetizantes)	520 g/m^2	680 g/m^2
Biomassa dos consumidores primários (herbívoros)	0,07 g/m^2	120 g/m^2
Biomassa dos consumidores secundários (carnívoros)	0,01 g/m^2	9 g/m^2

Construa as pirâmides de biomassa para esses dois ecossistemas usando uma escala apropriada.

36. É importante refletir sobre a questão dos combustíveis fósseis, isto é, aqueles que se formaram a partir de seres vivos que viveram há centenas de milhões de anos. É o caso do petróleo e do carvão mineral, que movimentam praticamente toda a indústria e os veículos do mundo. Esses combustíveis não são renováveis, e suas reservas estão diminuindo rapidamente e terminarão por se esgotar. Imagine o mundo desprovido de petróleo ou carvão. Quais seriam as alternativas energéticas da humanidade? Troque idéias com outras pessoas. Tente avaliar o grau de informação e de interesse das pessoas sobre esse tema. Pesquise mais sobre o assunto, que certamente terá cada vez mais importância no futuro.

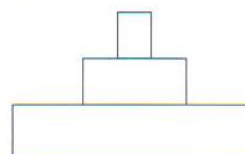
A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

37. (UFSM-RS) Indique se é verdadeira (V) ou falsa (F) cada uma das afirmativas a seguir:
( ) Produtores realizam fotossíntese ou quimiossíntese.
( ) Numa pirâmide de energia, o nível dos consumidores é sempre maior que o dos produtores.
( ) Decompositores formam o primeiro nível trófico da cadeia alimentar pois, sem eles, o fluxo de energia não pode se processar.

A seqüência correta é
a) V - F - F.
b) F - V - V.
c) V - F - V.
d) V - V - V.
e) F - F - F.

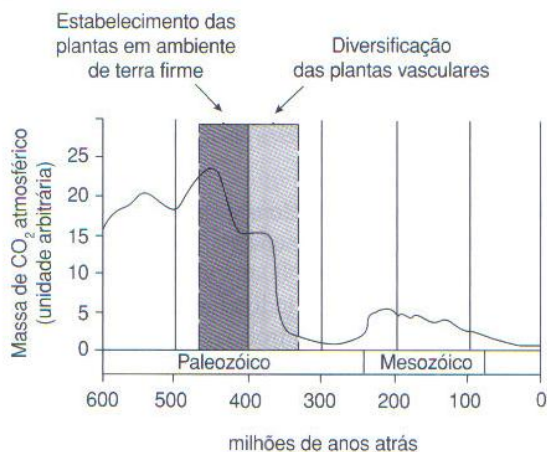
38. (PUC-Campinas-SP) Considere:
I. maior acúmulo de energia;
II. maior biomassa;
III. maior número de indivíduos;
Nos primeiros níveis tróficos de um ecossistema no qual os produtores são gramíneas,
a) ocorre somente I.
b) ocorrem somente I e II.
c) ocorrem somente I e III.
d) ocorrem somente II e III.
e) ocorrem I, II e III.

39. (UFSCar-SP) O diagrama seguinte representa uma pirâmide de energia:

A largura de cada nível dessa pirâmide, quando analisada de baixo para cima, representa
a) a quantidade de energia disponível para o nível trófico seguinte.
b) o número de produtores, consumidores primários e consumidores secundários, respectivamente.
c) o tamanho dos produtores, consumidores primários e consumidores secundários, respectivamente.
d) a quantidade de energia perdida, quando se passa de um nível trófico para o seguinte.
e) a produtividade primária bruta, a produtividade primária líquida e a produtividade secundária líquida, respectivamente.

40. (Enem-MEC) A falta de água doce no Planeta será, possivelmente, um dos mais graves problemas deste século. Prevê-se que, nos próximos vinte anos, a quantidade de água doce disponível para cada habitante será drasticamente reduzida.

Por meio de seus diferentes usos e consumos, as atividades humanas interferem no ciclo da água, alterando

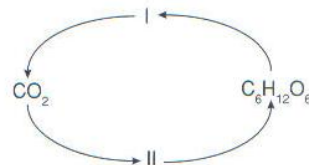
a) a quantidade total, mas não a qualidade da água disponível no Planeta.
b) a qualidade da água e sua quantidade disponível para o consumo das populações.
c) a qualidade da água disponível, apenas no sub-solo terrestre.
d) apenas a disponibilidade de água superficial existente nos rios e lagos.
e) o regime de chuvas, mas não a quantidade de água disponível no Planeta.

41. (Fuvest-SP)

O gráfico mostra a variação na concentração de gás carbônico atmosférico (CO_2), nos últimos 600 milhões de anos, estimada por diferentes métodos. A relação entre o declínio da concentração atmosférica de CO_2 e o estabelecimento e a diversificação das plantas pode ser explicada, pelo menos em parte, pelo fato de as plantas

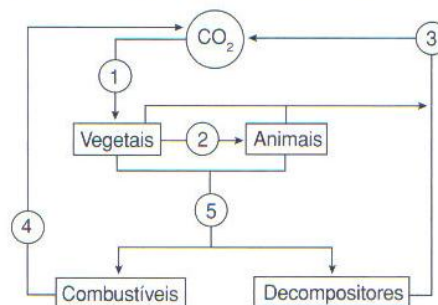
a) usarem o gás carbônico na respiração celular.
b) transformarem átomos de carbono em átomos de oxigênio.
c) resfriarem a atmosfera evitando o efeito estufa.
d) produzirem gás carbônico na degradação de moléculas de glicose.
e) imobilizarem carbono em polímeros orgânicos, como celulose e lignina.

42. (Enem-MEC) Do ponto de vista ambiental, uma distinção importante que se faz entre os combustíveis é serem provenientes ou não de fontes renováveis. No caso dos derivados de petróleo e do álcool de cana, essa distinção se caracteriza

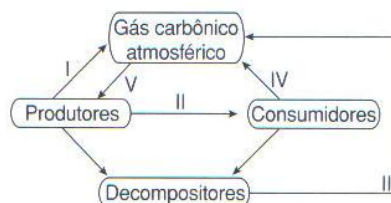
a) pela diferença nas escalas de tempo de formação das fontes, período geológico no caso do petróleo e anual no da cana.
b) pelo maior ou menor tempo para se reciclar o combustível utilizado, tempo muito maior no caso do álcool.
c) pelo maior ou menor tempo para se reciclar o combustível utilizado, tempo muito maior no caso dos derivados do petróleo.
d) pelo tempo de combustão de uma mesma quantidade de combustível, tempo muito maior para os derivados do petróleo do que do álcool.
e) pelo tempo de produção de combustível, pois o refino do petróleo leva dez vezes mais tempo do que a destilação do fermento de cana.

43. (UFSM-RS) Observe o esquema a seguir, que é uma simplificação do ciclo do carbono.

Nesse ciclo, se I representar os

a) consumidores, II representará os decompositores.
b) consumidores, II representará os produtores.
c) produtores, II representará os consumidores.
d) produtores, II representará os decompositores.
e) decompositores, II representará os consumidores.

44. (Vunesp-2001) O ciclo do carbono na natureza pode ser representado, simplificadamente, da seguinte maneira.

Os números de 1 a 5 indicam, respectivamente:

a) fotossíntese, nutrição, respiração, combustão e morte;
b) respiração, nutrição, fotossíntese, morte e combustão;
c) nutrição, combustão fotossíntese, morte e respiração;
d) fotossíntese, combustão, respiração, morte e nutrição;
e) fotossíntese, respiração, nutrição, combustão e morte;

45. (Fuvest-SP) O esquema a seguir representa o ciclo do carbono.

A utilização do álcool como combustível de automóveis intensifica, principalmente, a passagem representada por:

a) I
b) II
c) III
d) IV
e) V

46. (PUC-RS) A associação entre plantas leguminosas e bactérias do gênero *Rhizobium* é um exemplo de mutualismo envolvendo membros de reinos distintos. Por tratar-se de um mutualismo, ambos os organismos são beneficiados. O papel das bactérias do gênero *Rhizobium* nessa associação contribui significativamente para o ciclo global

a) do carbono.
b) do nitrogênio.
c) da água.
d) do fósforo.
e) do enxofre.

47. (UFV) Contrariando a sua fama de vilãs, como causadoras de doenças nos seres vivos, muitas bactérias se relacionam com a natureza como agentes importantes nos ciclos biogeoquímicos. No ciclo do nitrogênio, as bactérias nitrificantes convertem:

a) amônia em nitrato.
b) amônia em aminoácidos.
c) nitrogênio atmosférico em amônia.
d) nitrato em nitrogênio.
e) aminoácidos em amônia.

48. (UEL-PR) Na região Norte do Paraná muitas áreas estão sendo ocupadas por culturas de milho e de trigo. Essas culturas têm provocado desgaste do solo. Para evitar esse desgaste, os agricultores adotam o rodízio de culturas, prática na qual se alterna o plantio do milho e do trigo com o da soja. Essa prática agrícola pode incorporar nutrientes ao solo porque a soja possui em suas raízes bactérias fixadoras de:

a) oxigênio.
b) carbono.
c) fósforo.
c) cálcio.
e) nitrogênio.

49. (PUC-RJ) Apesar de a atmosfera terrestre ser constituída em sua maior parte por nitrogênio, este não pode ser diretamente absorvido pelas plantas. As plantas podem obter do solo e da água, sob a forma de nitratos, o nitrogênio utilizado pelos organismos. Os nitratos são produzidos por

a) decomposição das rochas por ação das intempéries.
b) bactérias fixadoras.
c) decompositores em geral.
d) plantas em putrefação.
e) animais em decomposição.

50. (UFSM-RS) Pode-se relacionar a formação da camada de ozônio com o ciclo do:

a) nitrogênio.
b) carbono.
c) oxigênio.
d) enxofre.
e) fósforo.

51. (UERJ) ESTUDO REVELA QUE AMAZÔNIA FERE OZÔNIO

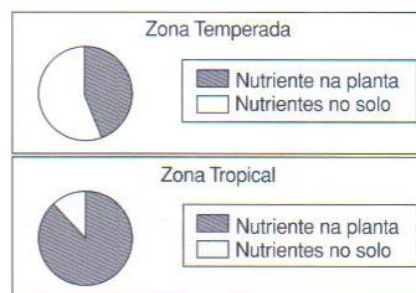
Maior floresta equatorial do planeta, com reflexos no meio ambiente mundial, a Amazônia registra grande número de raios, que caem a menos de 15km do solo e têm efeito destrutivo na camada de ozônio.

("Jornal do Brasil", 14/07/99)

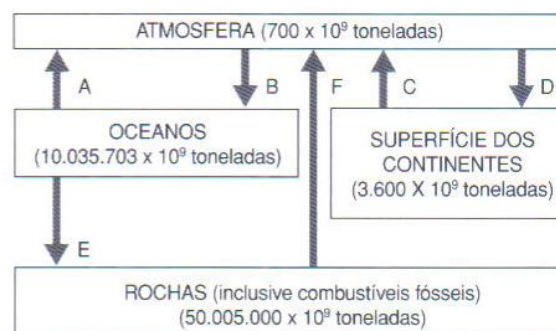
A camada de ozônio da atmosfera é importante para o meio ambiente porque

a) fornece oxigênio, reduzindo a respiração vegetal.
b) reage com ácido sulfúrico, formando a chuva ácida.
c) bloqueia a radiação ultravioleta, protegendo os tecidos animais.
d) facilita a passagem da radiação infravermelha, diminuindo a ocorrência de mutagênese.

QUESTÕES DISCURSIVAS

52. (UFRJ) Dada a distribuição de nutrientes descrita nas figuras abaixo e sabendo que a pluviosidade média anual é maior na zona tropical, em que zona diminuiria mais rapidamente a produtividade de plantações instaladas, após a retirada das árvores originais para utilização comercial da madeira? Justifique sua resposta.

53. (Unicamp-SP) A produtividade primária em um ecossistema pode ser avaliada de várias formas. Nos oceanos, um dos métodos para medir a produtividade primária utiliza garrafas transparentes e garrafas escuras, totalmente preenchidas com água do mar, fechadas e mantidas em ambiente iluminado. Após um tempo de incubação, mede-se o volume de oxigênio dissolvido na água das garrafas. Os valores obtidos são relacionados à fotossíntese e à respiração.

a) Por que o volume de oxigênio é utilizado na avaliação da produtividade primária?
b) Explique por que é necessário realizar testes com os dois tipos de garrafas.
c) Quais são os organismos presentes na água do mar responsáveis pela produtividade primária?

54. (Fuvest-SP) No esquema a seguir, os retângulos representam os quatro maiores reservatórios do elemento carbono em nosso planeta e as setas indicam o fluxo do carbono entre esses reservatórios.

(Baseado em Trabalka, J. K. & Reichle, D. E. (eds.) "The Changing Carbon Cycle: a global analysis"; Springer, Nova York, 1986).

Indique, justificando:

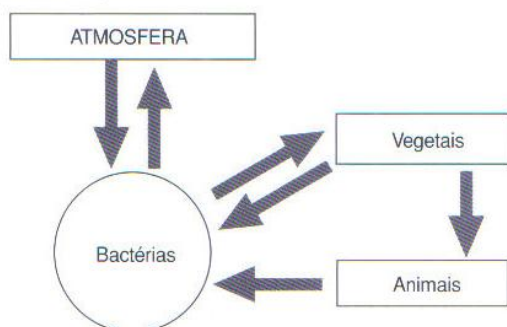
a) os fluxos que incluem os processos de fotossíntese, respiração aeróbica e fermentação, realizados pelos seres vivos atuais.

b) o fluxo que é diretamente afetado pelas usinas termoelétricas a carvão mineral.

55. (Vunesp) A fixação biológica de nitrogênio vem sendo estudada há 50 anos. Neste período, muitos conhecimentos em relação a esse processo foram produzidos.

a) Quais são os organismos responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio?

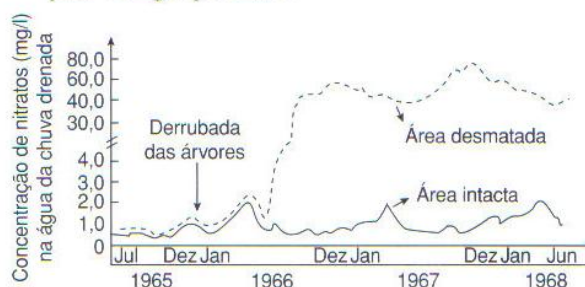
b) Por que a presença desses organismos no solo contribui para sua fertilização?

56. (Fuvest-SP)

a) O esquema mostra, de maneira simplificada, o ciclo de que elemento químico?

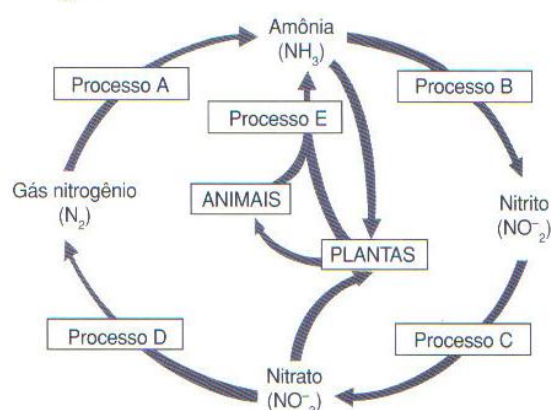
b) Que informação, dada pelo esquema, permite identificar esse elemento químico?

c) Cite duas classes de macromoléculas presentes nos seres vivos, que contenham esse elemento químico.

57. (Fuvest-SP) Após alguns meses de monitoramento de uma região de floresta temperada (de julho a dezembro de 1965), a vegetação de uma área foi derrubada e impediu-se o crescimento de novas plantas.

Tanto a área de floresta intacta quanto a área desmatada continuaram a ser monitoradas durante os dois anos e meio seguintes (de janeiro de 1966 a junho de 1968). O gráfico a seguir mostra as concentrações de nitratos presentes nas águas de chuva drenadas das duas áreas para córregos próximos.

a) Se, em 1968, a vegetação da área intacta tivesse sido removida e ambas as áreas tivessem sido imediatamente usadas para cultivo de cereais, era de se esperar que houvesse maior produtividade de grãos em uma delas? Por quê?

b) Qual elemento químico do nitrato é fundamental para a manutenção de um ecossistema? Por quê?

58. (Fuvest-SP) O esquema representa o ciclo do elemento nitrogênio:

a) Explique de que maneira os animais obtêm nitrogênio para a fabricação de suas substâncias orgânicas.

b) Em quais dos processos indicados por letras (A, B, C, D e E) participam bactérias?

c) Qual a importância do processo E para a continuidade da vida?

CAPÍTULO

15 DINÂMICA DAS POPULAÇÕES BIOLÓGICAS

▶ Superconcentração de borboletas monarca cobrindo completamente a vegetação, no México.

15.1 Características das populações

População biológica é um grupo de indivíduos de mesma espécie que convivem em determinada área geográfica. Cada população evolui e se adapta ao ambiente como uma unidade no ecossistema. Assim, populações surgem, crescem e se estabilizam, mantendo um equilíbrio com os demais componentes da biocenose, mas elas podem também declinar ou se extinguir. A população humana, por exemplo, cresce atualmente em ritmo acelerado e defronta-se com intrincados problemas de sobrevivência, o que tem sido motivo de preocupação para cientistas e políticos: a Terra está se tornando superpovoada pela espécie humana. O esgotamento dos recursos ambientais e o desequilíbrio ecológico estão entre as principais conseqüências desse superpovoamento.

Há dois aspectos importantes na caracterização de uma população: a densidade populacional e a taxa de crescimento. No caso da espécie humana, o estudo estatístico do tamanho e da estrutura (relativa à idade e ao sexo dos indivíduos) das populações, assim como das variações desses parâmetros dentro delas, é chamado de **demografia** (do grego *demos*, povo, e *graphe*, descrição).

Densidade populacional

Uma informação importante a respeito de qualquer população é a **densidade populacional**, definida como o número de indivíduos de uma mesma espécie que vivem em determinada área ou volume (no caso de hábitats aquáticos, por exemplo). Essa definição está representada a seguir:

$$\textbf{Densidade populacional} = \frac{\text{Número de indivíduos}}{\text{Área ou volume}}$$

A densidade das populações humanas, denominada **densidade demográfica** (do grego *demos*, povo), é calculada com base em recenseamentos periódicos, os censos demográficos. Por exemplo, o censo realizado em 1990 estimou a população brasileira em aproximadamente 150 milhões de pessoas, distribuídas pelos 8,5 milhões de quilômetros quadrados de superfície do território nacional. Assim, a densidade demográfica do Brasil, naquele ano, era de aproximadamente 17,6 hab./km² (habitantes por quilômetro quadrado). No ano 2000, o censo mostrou que a população brasileira estava constituída por 169 milhões de pessoas; como nosso território permaneceu o mesmo, concluímos que a densidade demográfica brasileira aumentou para 19,8 hab./km². Em outras palavras, na área hipotética de um quilômetro quadrado, em que havia aproximadamente 18 pessoas (17,6 hab./km²) em 1990, passaram a viver mais duas pessoas em 2000 (19,8 hab./km²). **(Fig. 15.1)**

Taxas de crescimento populacional

O estudo do crescimento populacional é importante para entender o comportamento das populações de um ecossistema. Medidas do tamanho de uma população, tomadas em diferentes intervalos de tempo, informam se ela está em expansão, em declínio ou estável, o que permite fazer correlações com fatores como disponibilidade de alimento, clima etc.

Pode-se definir **taxa de crescimento** de uma população como a variação (aumento ou diminuição) do número de indivíduos em determinado intervalo de tempo. Fala-se em **taxa de crescimento absoluto** quando não se leva em conta o tamanho da população, mas apenas a variação do número de indivíduos no período considerado. Essa relação está expressa na representação a seguir:

$$\text{Taxa de crescimento absoluto} = \frac{Nf - Ni}{t}$$

Nessa expressão, o significado das siglas é:

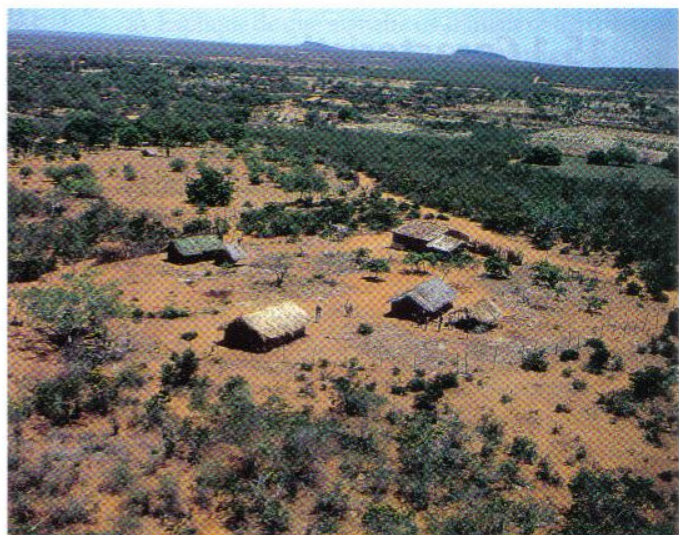
Ni = número de indivíduos no início do período considerado;

Nf = número de indivíduos no final do período considerado;

t = duração do período considerado.

Analise, a seguir, alguns exemplos de taxas de crescimento.

1. Considere uma população de paramécios (protozoários de água doce), constituída inicialmente por 2 mil indivíduos (Ni = 2.000). Uma hora mais tarde (t = 1 h) havia 4 mil indivíduos (Nf = 4.000). Nesse caso, a taxa de crescimento absoluto foi, no período analisado, de 2 mil indivíduos por hora.
2. No estudo de duas populações de bactérias (A e B) foram registrados os seguintes resultados:

Tempo	Nº de bactérias/mL de meio de cultura	
	População A	População B
Início	10.000	200.000
Após 3 h	40.000	500.000

▲ **Figura 15.1** • A densidade demográfica calculada para todo o território brasileiro informa pouco sobre a população e a ocupação territorial. No Brasil, há desde centros urbanos superpovoados até áreas rurais muito pouco ocupadas. No ano 2000, a densidade demográfica do estado de São Paulo, por exemplo, era de 137,1 hab./km², ao passo que a densidade demográfica no estado do Amazonas era de 1,5 hab./km².

Com base nesses dados, podem-se determinar as taxas de crescimento absoluto (TCA) para cada uma das populações de bactérias:

- $\text{TCA de A} = \dfrac{40.000 - 10.000}{3\text{ h}} = 10.000 \text{ indivíduos / h}$

- $\text{TCA de B} = \dfrac{500.000 - 200.000}{3\text{ h}} = 100.000 \text{ indivíduos / h}$

Os valores das taxas de crescimento absoluto informam que, no período considerado, o aumento do número de bactérias na população B foi dez vezes maior do que na população A. Entretanto, como a população B era inicialmente maior, não podemos saber se esse crescimento absoluto maior significa que ela tenha crescido proporcionalmente mais rápido que a população A. Para saber, devemos incluir no cálculo o tamanho inicial de cada população, obtendo assim a chamada **taxa de crescimento relativo**. Esta pode ser definida como a variação do número de indivíduos de uma população em relação ao seu número inicial.

Para se determinar a taxa de crescimento relativo toma-se o número de indivíduos da população no tempo final (Nf), subtrai-se dele o número de indivíduos da população no tempo inicial (Ni) e divide-se o resultado obtido pelo número de indivíduos que havia na população no tempo inicial (ni). Com isso, determina-se a taxa de crescimento em relação ao tamanho da população como a seguir.

$$\textbf{Taxa de crescimento relativo} = \dfrac{\dfrac{Nf - Ni}{Ni}}{t}$$

As taxas de crescimento relativo (TCR) para as duas populações de bactérias do exemplo anterior são, portanto:

- $\text{TCR de A} = \dfrac{\dfrac{40.000 - 10.000}{10.000}}{3\text{ h}} = \textbf{1 indivíduo / hora}$

- $\text{TCR de B} = \dfrac{\dfrac{500.000 - 200.000}{200.000}}{3\text{ h}} = \textbf{0,5 indivíduo / hora}$

Essas taxas indicam que a população A cresce em ritmo mais acelerado do que a população B. Em A, foi acrescentada uma nova população à antiga a cada hora, ou seja, a população dobrou de tamanho (cresceu 100%) a cada hora. Em B, a taxa de crescimento foi metade da ocorrida em A, ou seja, em uma hora a população cresceu 50% em relação à população inicial.

Taxa de natalidade e taxa de mortalidade

O crescimento de uma população é determinado, fundamentalmente, por dois fenômenos: a **natalidade** (número de indivíduos que nascem) e a **mortalidade** (número de indivíduos que morrem). Outros fatores que também afetam o tamanho de uma população são a **imigração**, que é a entrada de novos indivíduos na população, e a **emigração**, que é a saída de indivíduos da população. **(Fig. 15.2)**

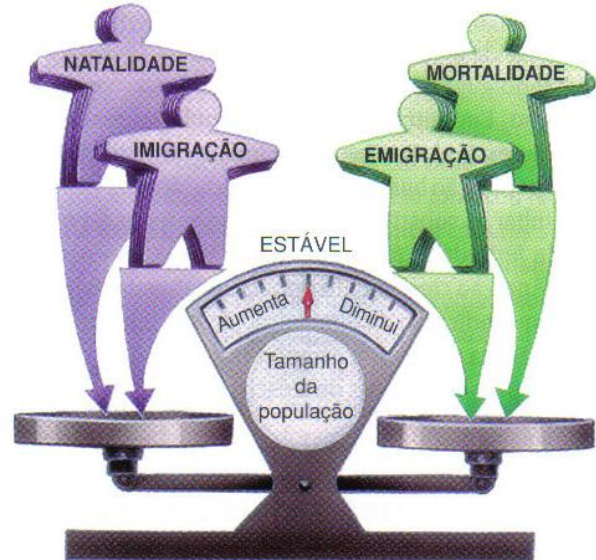



Figura 15.2 • O crescimento de uma população resulta da interação de quatro fatores: natalidade, mortalidade, imigração e emigração.

Na espécie humana, costuma-se expressar a **taxa de natalidade** como o número de crianças nascidas no período de um ano para cada 1.000 habitantes da população. Analogamente, **taxa de mortalidade** é o número de óbitos (mortes) ocorridos no período de um ano para cada 1.000 habitantes da população. Ao expressarmos o número de nascimentos ou de óbitos por 1.000 habitantes, estamos "relativizando-os", ou seja, tornando-os comparáveis aos de outras populações. Por exemplo, se ocorreram dois nascimentos no ano em uma população de 1.000 habitantes, a taxa de natalidade é igual a 2/1.000, o dobro da taxa de natalidade de uma população de 4.000 habitantes na qual tenham nascido 4 pessoas no ano (4/4.000 ou 1/1.000).

$$\text{Taxa de natalidade} = \dfrac{\text{Número de nascimentos no ano}}{1.000 \text{ pessoas}}$$

$$\text{Taxa de mortalidade} = \dfrac{\text{Número de mortes no ano}}{1.000 \text{ pessoas}}$$

As taxas de mortalidade costumam ser detalhadas por faixa de idade. A taxa de mortalidade infantil, por exemplo, expressa o número de óbitos de crianças com menos de 1 ano por 1.000 nascidos vivos no período de doze meses.

Índice de fertilidade

Uma informação importante sobre certos tipos de população é o **índice de fertilidade**, definido como o número médio de descendentes produzidos por uma fêmea durante seu período reprodutivo. Se na espécie humana uma população tiver índice de fertilidade igual a 2, o número médio de filhos por casal é 2; nesse caso, os filhos da geração seguinte substituem seus pais, resultando a manutenção do número de pessoas da população. Em outras palavras, a população tende a se manter estável. Por isso, se o índice de fertilidade de uma população humana é 2, a reprodução atua de modo a resultar na substituição da geração anterior. Se o índice de fertilidade for superior a 2, é uma indicação de tendência ao crescimento populacional; se for inferior a 2, é uma indicação da diminuição do tamanho da população. Saiba mais sobre a importância do índice de fertilidade para estimativas de crescimento populacional na Leitura deste capítulo.

Tempo (h)	Nº de indivíduos
0	100
1	200
2	400
3	800
4	1.600
5	3.200
6	6.400
7	12.800
8	25.600
9	51.200
10	102.400

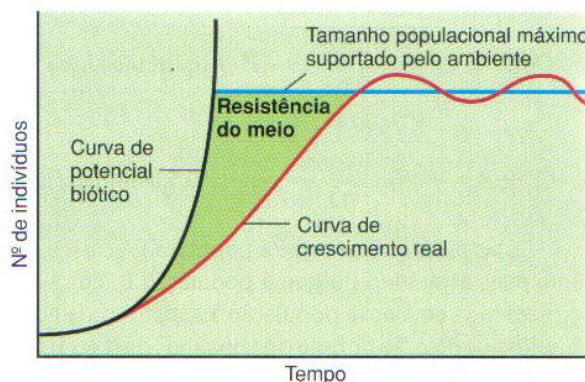
▲ **Figura 15.3** • Gráfico que mostra a curva de potencial biótico para uma população de microrganismos com índice de mortalidade zero, no período considerado, e na qual a população duplica a cada hora. Gráficos com curva semelhante são esperados para qualquer população biológica. Esse tipo de curva é característico de um crescimento em progressão geométrica, em que, a intervalos iguais de tempo, o número de indivíduos da população dobra.

Curvas de crescimento populacional

Qualquer população tem potencial para crescer indefinidamente. Se a mortalidade fosse zero, uma única bactéria, reproduzindo-se a cada 20 minutos, levaria apenas 36 horas para produzir descendência suficiente para cobrir toda a superfície da Terra. Um único paramécio poderia produzir, em alguns dias, uma massa de indivíduos correspondente a 10 mil vezes a massa da Terra. Um único casal de pássaros, chocando de 5 a 6 ovos por ano, ao final de 15 anos produziria 10 milhões de descendentes. Essa capacidade máxima de crescimento de uma população biológica denomina-se **potencial biótico**. **(Fig. 15.3)**

Em condições naturais, o potencial de crescimento de uma população é limitado pela disponibilidade de recursos como alimento, de espaço e de abrigo bem como pela ação de possíveis predadores, parasitas e populações competidoras. A esse conjunto de fatores que limitam o crescimento de uma população dá-se o nome de **resistência do meio**[1].

A resistência do meio cresce proporcionalmente ao aumento da densidade populacional, até atingir um ponto em que as taxas de natalidade e de mortalidade são equivalentes e o número de indivíduos da população permanece mais ou menos constante ao longo do tempo.

A **curva de crescimento real** de uma população, portanto, resulta da interação entre seu potencial biótico (isto é, sua capacidade de crescer) e a resistência imposta pelo hábitat onde ele vive. Em uma representação gráfica, o crescimento de uma população a partir de uns poucos indivíduos iniciais descreve uma curva em forma de S (curva sigmóide), que ascende até o limite máximo de indivíduos que o ambiente consegue suportar. Denomina-se esse limite **carga biótica máxima do ambiente**. **(Fig. 15.4)**

▲ **Figura 15.4** • Gráfico que representa a curva de crescimento de uma população a partir de um pequeno número de indivíduos iniciais. O aspecto da curva resulta da interação entre o potencial biótico da espécie e a resistência do meio.

[1] Lembre-se de que as restrições do ambiente à sobrevivência dos organismos foram caracterizadas por Darwin como os agentes da seleção natural; a cada geração sobrevivem apenas os mais capacitados na "luta pela vida".

15.2 Fatores que regulam o tamanho de populações biológicas

O conceito de carga biótica máxima

Na década de 1930, o cientista russo G. F. Gause colocou alguns exemplares do besouro *Tribolium confusum* em uma caixa com 16 g de alimento (farinha) e contou periodicamente o número de indivíduos, ao longo de 150 dias de experimentação. Em outra caixa, Gause colocou o mesmo número de besouros, mas adicionou 64 g de farinha, ou seja, quatro vezes mais alimento do que na primeira caixa. Na primeira caixa, o tamanho máximo atingido pela população foi menor (650 besouros) do que na segunda (1.750 besouros). **(Fig. 15.5)**

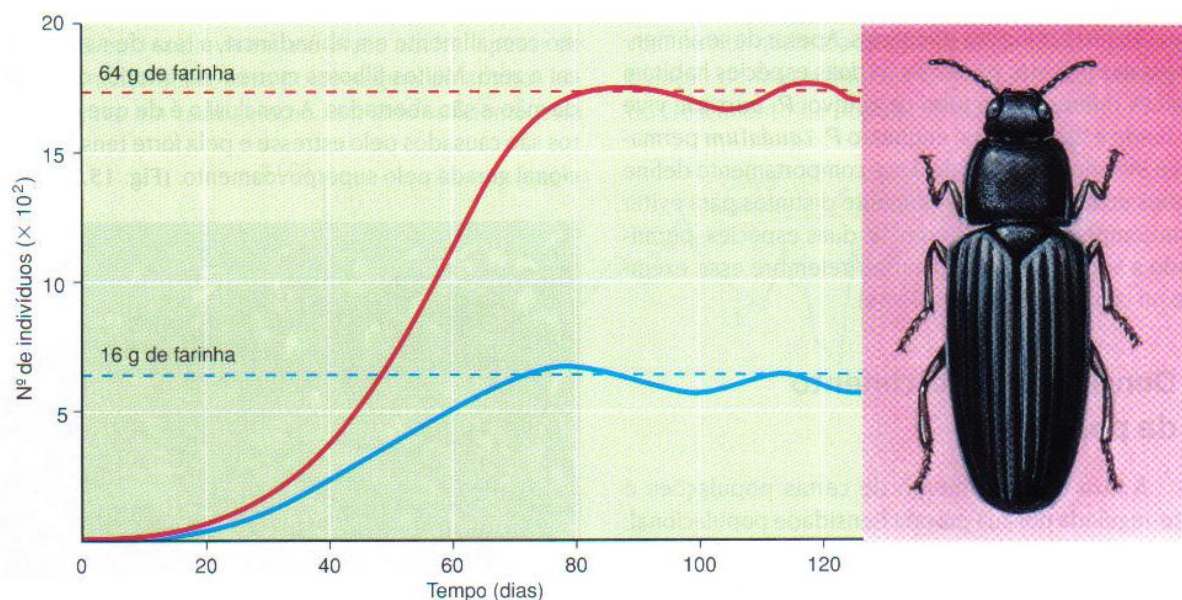
O experimento de Gause permitiu chegar a uma conclusão simples, mas importante: cada tipo de ambiente pode suportar uma quantidade máxima de indivíduos. Nesse caso, os dois ambientes diferiam apenas quanto à quantidade de alimento disponível, que foi, portanto, o fator responsável pela diferença no crescimento das duas populações de *Tribolium*.

Na natureza, além do aspecto alimentar, há diversos outros fatores que limitam o crescimento. Em conjunto, esses fatores determinam a **carga biótica máxima**, definida como o tamanho máximo de determinada população que um ambiente pode suportar.

Competição entre populações de diferentes espécies

Como vimos no capítulo 14, Gause estudou também o comportamento de populações de diferentes espécies de protozoários do gênero *Paramecium*. Mantendo os paramécios em frascos e alimentando-os periodicamente com bactérias, Gause chegou às mesmas conclusões que no experimento com besouros: o tamanho final das populações de paramécios dependia da quantidade de bactérias fornecida em cada ração.

Em um outro experimento Gause forneceu rações com a mesma quantidade de alimento a culturas separadas de duas espécies de paramécios — *P. caudatum* e *P. aurelia*. Em um terceiro frasco de cultivo, colocou quantidades iguais de exemplares de *P. caudatum* e de *P. aurelia*, e alimentou essa cultura mista das duas espécies exatamente como as culturas anteriores. Os indivíduos de cada espécie foram contados diariamente, durante 16 dias. Seu experimento mostrou que ocorria **competição** entre as duas espécies; *P. aurelia* acabou por eliminar *P. caudatum*.

Gause concluiu que, se duas populações exploram nichos ecológicos muito similares no mesmo hábitat, como é o caso de *P. aurelia* e *P. caudatum*, tendem a competir acirradamente e, provavelmente, uma acabará eliminando a outra. Essa conclusão, como vimos no capítulo 14, foi denominada princípio da exclusão competitiva. **(Fig. 15.6**, na página seguinte**)**

▲ **Figura 15.5** • Curva de crescimento de duas populações do besouro *Tribolium confusum*, criadas com 16 g de farinha (curva em azul) e com 64 g de farinha (curva em vermelho). A linha pontilhada corresponde à carga biótica máxima do meio, representada nesse experimento pela quantidade de farinha disponível para alimentar os besouros. Esse experimento foi realizado por Gause, na década de 1930.

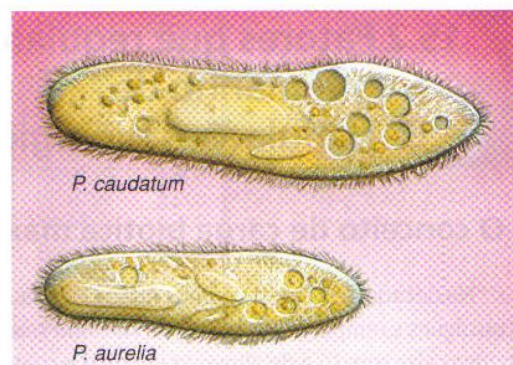
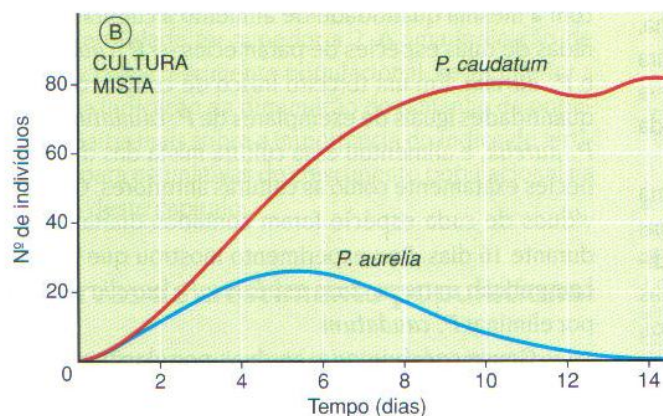
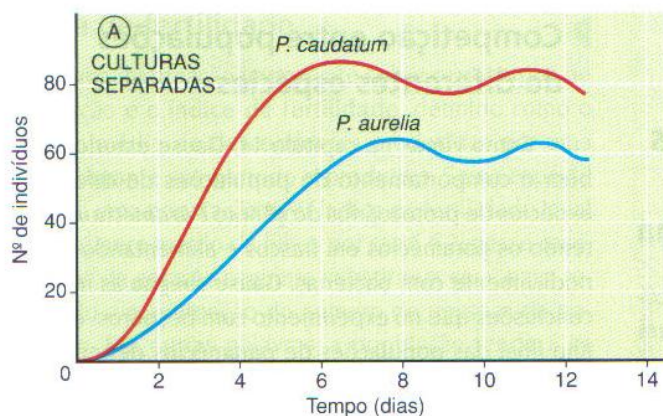



Figura 15.6 • Curvas de crescimento de duas espécies de *Paramecium*, *P. aurelia* e *P. caudatum* (ilustração acima, à direita). Em **A**, curvas obtidas quando as duas espécies foram cultivadas separadamente. Os meios de cultura apresentavam o mesmo nível de acidez e ambas as populações foram alimentadas periodicamente com a mesma quantidade de bactérias. Em **B**, as duas espécies foram cultivadas juntas, no mesmo frasco. Gause concluiu que a diferença entre os gráficos resulta da competição entre as duas espécies.

Em outro experimento, com as espécies *P. caudatum* e *P. bursaria*, uma espécie não eliminou a outra, como no caso anterior. Após algum tempo, o crescimento das duas populações equilibrou-se.

P. caudatum e *P. bursaria* convivem porque possuem nichos ecológicos diferentes. Apesar de se alimentarem das mesmas bactérias, as duas espécies habitam regiões diferentes do tubo de cultivo; *P. bursaria* vive no fundo e nas paredes, enquanto *P. caudatum* permanece livre no meio líquido. Esse comportamento define nichos ecológicos suficientemente distintos para evitar uma competição severa entre as duas espécies, permitindo a sobrevivência de ambas (relembre esse exemplo no capítulo 13 deste volume).

Densidade e crescimento da população

A taxa de crescimento de certas populações é auto-regulada por sua própria densidade populacional: quando esta aumenta além de certo limite, a natalidade diminui. Isso é conseqüência, entre outros fatores, do aumento da competição alimentar entre os membros da população e da competição entre os casais por locais de procriação. Na espécie de pássaros *Parus major*, por exemplo, o número médio de filhotes por ninho é 14, quando a densidade da população é inferior a um casal por hectare, e 8, quando a densidade é de 18 casais por hectare.

Em experimentos com ratos verifica-se que, quando as gaiolas de criação se tornam superpovoadas, mesmo com alimento em abundância, a taxa de natalidade cai a zero. Muitos filhotes morrem no interior do corpo da mãe e são abortados. A conclusão é de que os abortos são causados pelo estresse e pela forte tensão emocional gerada pelo superpovoamento. **(Fig. 15.7)**

Figura 15.7 • Foto de um ninhal superpovoado de jaburus do pantanal mato-grossense. Acima de determinado limite de densidade, muitas populações reduzem sua taxa de natalidade em conseqüência do aumento da competição e do estresse causado pela superpopulação.

15.3 Oscilações em populações naturais

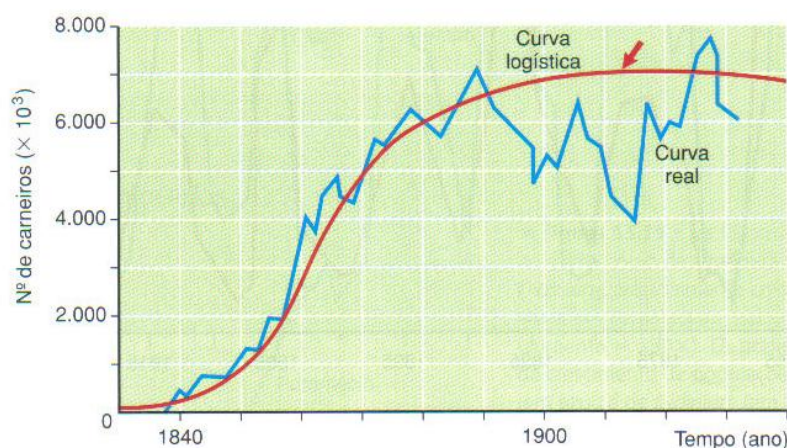
Fatores que limitam o crescimento populacional

Os principais fatores ambientais que limitam o crescimento de uma população são: densidade populacional, disponibilidade de alimentos, competição entre os indivíduos da mesma espécie (competição intraespecífica), competição entre indivíduos de espécies diferentes (interespecífica), predação e parasitismo. Uma população em equilíbrio pode sofrer os efeitos do aumento da intensidade de um ou mais fatores limitantes, o que causa diminuição do tamanho populacional. O abrandamento de um fator limitante, por outro lado, pode determinar maior taxa de crescimento. Os fatores limitantes variam constantemente de intensidade, o que acarreta flutuações no tamanho das populações naturais. **(Fig. 15.8)**

Estudos realizados em populações da borboleta-da-couve *Pieris brassica* forneceram exemplos de alguns dos fatores que limitam o crescimento de uma população natural. A maioria dos indivíduos nascidos a cada geração morre por: doenças na fase de lagarta (59%), parasitismo da lagarta por outras espécies (34%), predação por pássaros (4%), doenças e parasitas da fase de crisálida (2,74%). Assim, a taxa de sobrevivência é de apenas 0,26%, ou seja, de cada 1.000 larvas nascidas, apenas 2 ou 3 sobrevivem até a fase adulta. Apesar de parecer muito baixa, essa porcentagem de adultos sobreviventes em cada geração tem sido suficiente para manter estável o tamanho das populações dessa borboleta ao longo do tempo. Fenômenos semelhantes devem ocorrer em populações de diferentes espécies. **(Fig. 15.9)**

Exemplos da regulação do tamanho populacional pela predação

Um exemplo clássico de regulação de tamanho populacional é o das populações de linces e lebres que vivem na região ártica do Canadá. Os dados referentes ao comportamento dessas duas populações foram coletados, durante 80 anos (de 1855 a 1935), pela Companhia da Baía de Hudson, que registrava o número de peles comercializadas pelos caçadores da região. Como o número de caçadores era conhecido e mudava muito pouco de ano para ano, concluiu-se que as variações da quantidade de peles refletiam as variações do tamanho relativo das populações das espécies caçadas.

Traçando no mesmo gráfico as curvas de densidade das populações de lebres e linces, verifica-se que a população de linces sempre alcançava seu desenvolvimento máximo 1 ou 2 anos após a população de lebres ter atingido o seu máximo. A interpretação mais plausível é que o tamanho das populações de lebres e linces depende da relação de predação existente entre essas duas espécies. Quando a população de lebres aumenta, a de linces também cresce, graças à maior quantidade de alimento disponível. Por outro lado, a maior quantidade de linces intensifica a predação, o que causa diminuição da população de lebres; com menor quantidade de alimento disponível, a população de linces diminui, o que permite a retomada do crescimento da população de lebres.

▲ **Figura 15.8** • Curva de crescimento da população de carneiros na Austrália, estimada com base em dados coletados entre os anos de 1845 e 1935. A linha azul representa a população real, que oscila em decorrência das variações dos fatores ambientais que regulam o crescimento. A linha vermelha é a curva logística, representativa de uma população que se estabiliza ao ser atingida a carga biótica máxima do meio (seta).

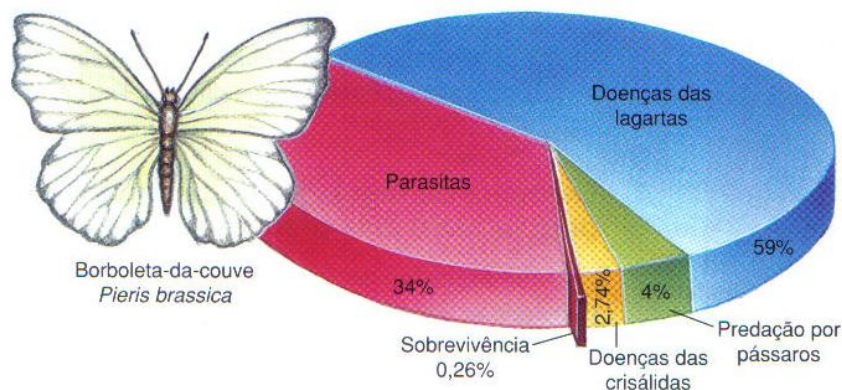



Figura 15.9 • Gráfico que mostra a porcentagem de lagartas da borboleta *Pieris brassica* que sobrevivem até a fase adulta e das que morrem por causas diversas.

Apesar da comodidade dessa explicação, outras hipóteses podem ser propostas. Por exemplo, o aumento da população de lebres pode fazer outros fatores atuarem de modo mais drástico. Por exemplo, em condições de alta densidade populacional, o alimento disponível para as lebres pode ser insuficiente e as doenças podem se espalhar com maior rapidez, o que também pode causar a diminuição correlata da população de linces. **(Fig. 15.10)**

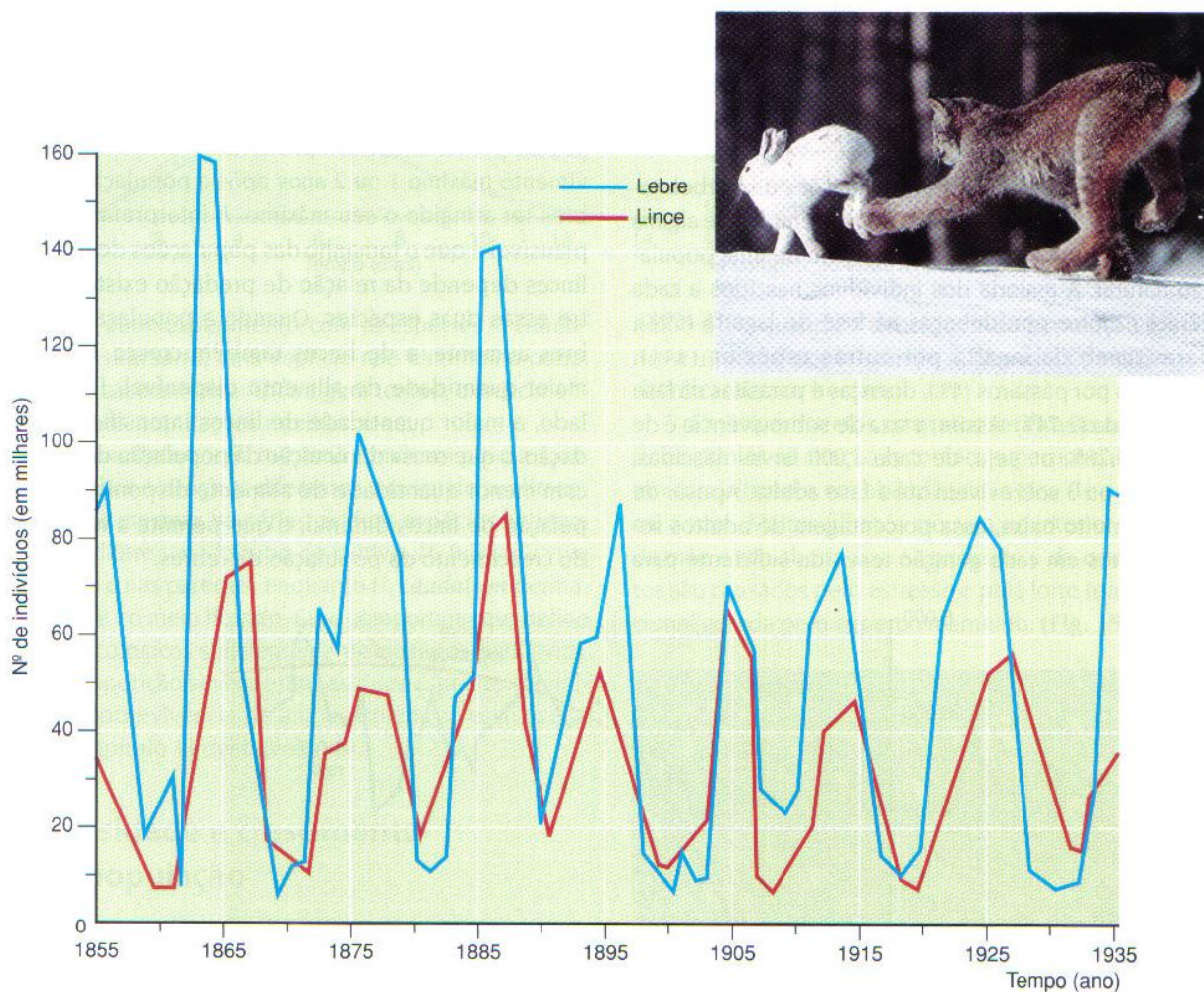
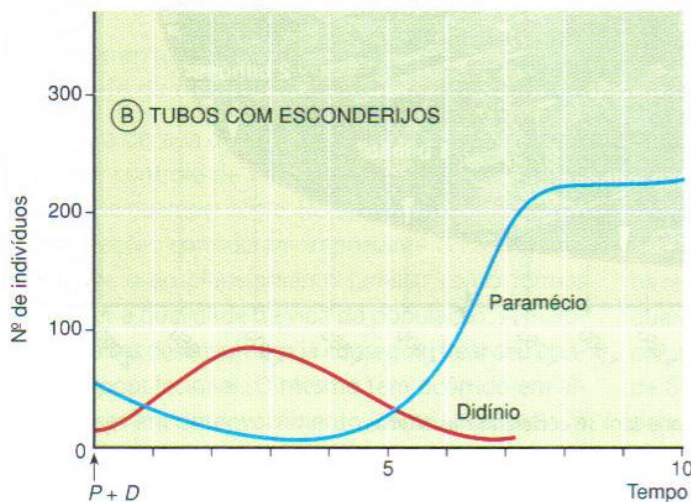
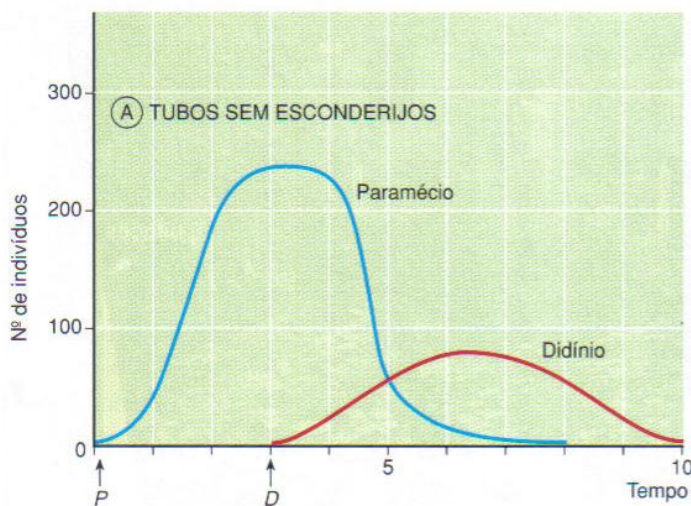



Figura 15.10 • Gráfico que mostra as flutuações de tamanho das populações de lebres e de linces no Canadá entre 1855 e 1935. A explicação mais plausível para a seqüência de flutuações é de que as populações de lebres e de linces se auto-regulam. Quando a população de lebres aumenta, os linces têm mais alimento e sua população cresce. O aumento do número de predadores, por sua vez, causa diminuição da população de lebres; isso leva à falta de alimento para os linces, e sua população diminui, permitindo que a de lebres aumente.

Outro exemplo de flutuação no tamanho populacional decorrente da predação foi obtido por Gause em experimentos realizados com o protozoário ciliado *Paramecium* (paramécio) e seu predador *Didinium* (didínio), também um protozoário ciliado.

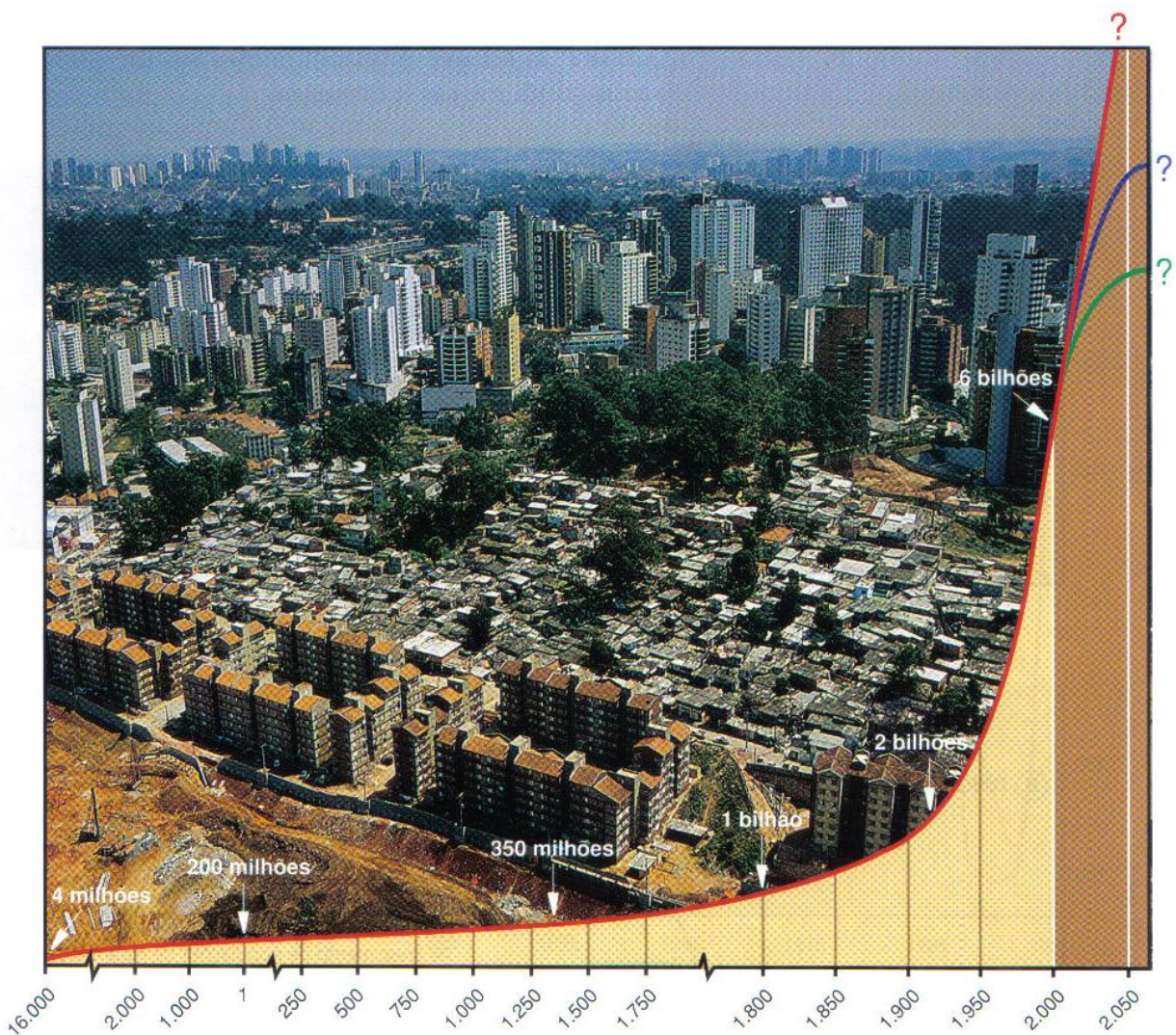
Ao se colocarem alguns exemplares de *Didinium* em uma cultura de *Paramecium*, a população destes diminuía devido à predação, enquanto a população de didínios aumentava; após algum tempo, todos os paramécios haviam desaparecido e, logo depois, os didínios também morriam. Gause imaginou que, se os paramécios pudessem se esconder dos predadores, pelo menos alguns poderiam sobreviver. Para testar essa hipótese, ele utilizou tubos de cultura com partículas e resíduos no fundo, onde os paramécios poderiam abrigar-se. A previsão foi confirmada: a população de paramécios não desapareceu nos tubos em que havia esconderijos. A população de didínios, porém, extinguiu-se depois de apresentar um crescimento expressivo no início. A explicação mais plausível para a extinção dos didínios é de que, após a predação inicial de paramécios, tornou-se muito difícil encontrar alimento. Com a extinção dos predadores, a população de paramécios pôde aumentar, até atingir o tamanho máximo permitido pelas condições do meio, isto é, sua carga biótica máxima. **(Fig. 15.11)**

Apesar das condições ecológicas muito simplificadas do tubo de cultura, o experimento de Gause mostrou a existência de relações de interdependência entre populações de presas e predadores. A extinção dos didínios só ocorreu porque não havia outro tipo de presa para substituir os paramécios. Pode-se imaginar que, em uma comunidade biológica natural com diferentes tipos de presa das quais os didínios pudessem se alimentar e também com recursos que permitissem aos paramécios se proteger dos predadores, as duas populações apresentariam flutuações uma em relação à outra, mas não se extinguiriam.

◄ **Figura 15.11** • Na fotomicrografia ao microscópio de varredura, o protozoário ciliado *Didinium*, artificialmente colorizado em marrom, ataca um *Paramecium*, colorizado em verde (aumento ≃ 350×). Os gráficos mostram as curvas de crescimento de populações de *Paramecium* (em azul) e de *Didinium* (em vermelho), criadas em um mesmo tubo de cultura. O gráfico **A** refere-se a tubos sem esconderijos para os paramécios. O gráfico **B** refere-se a tubos com detritos no fundo, onde os paramécios podiam se esconder. As setas indicam os momentos em que foram introduzidos os paramécios (*P*) e os didínios (*D*) nas culturas.

Crescimento da população humana mundial

Uma população humana é semelhante a qualquer população biológica e está sujeita aos mesmos fatores gerais que regulam e limitam o crescimento populacional. Entretanto, a humanidade tem conseguido controlar alguns fatores ambientais, o que permite um formidável ritmo de crescimento.

Calcula-se que no ano 8 000 a.C. a população humana era de aproximadamente 5 milhões de pessoas; na época de Cristo, atingiu os 300 milhões, saltando para 500 milhões em 1650; em 1850, já era de aproximadamente 1 bilhão de pessoas, passando a 2 bilhões em 1930; em 1990, a população humana já havia ultrapassado 5 bilhões e, no ano 2000, estava estimada em quase 6 bilhões de pessoas. **(Fig. 15.12)**

O crescimento acelerado da população humana deve-se principalmente à diminuição da taxa de mortalidade, decorrente tanto dos avanços agrícolas e tecnológicos, que aumentaram a produção de alimentos, como dos progressos médicos e sanitários, que prolongaram a **expectativa de vida**. →

▲ **Figura 15.12** • O crescimento da população humana tem se acelerado nas últimas décadas, e os cientistas têm feito projeções sobre as possíveis curvas de crescimento.

Nossa espécie tem sido muito bem-sucedida em sua capacidade de crescer e de colonizar os diversos hábitats da Terra. Esse sucesso tem, porém, aspectos negativos. Vivemos em um planeta finito, que está sendo rapidamente degradado pela superexploração dos recursos naturais. A superpopulação nos grandes centros urbanos gera desconfortos e favorece a propagação de doenças, em decorrência tanto da alta densidade demográfica como da dificuldade de se adotarem medidas sanitárias adequadas.

Um problema decorrente da expansão demográfica ilimitada é a produção de alimentos. Como alimentar um número cada vez maior de pessoas? Não se podem ampliar indefinidamente as áreas de terra cultivada. As terras férteis já estão sendo cultivadas e muitas delas já tiveram seus recursos esgotados; certas áreas demandariam tantos recursos para tornar-se produtivas que, pelo menos por enquanto, não há interesse em explorá-las. Por outro lado, os ecossistemas naturais que ainda restam, como a Amazônia, o cerrado e o pantanal mato-grossense, por exemplo, não podem ser explorados de forma predatória. É preciso manter áreas preservadas para não perder a enorme diversidade biológica (biodiversidade) produzida ao longo de bilhões de anos de evolução.

Novas tecnologias agrícolas têm permitido aumentar a produtividade dos campos cultivados; excedentes de safras poderiam ser transferidos para países onde há falta de alimentos; é possível recuperar solos desgastados ou impróprios para o cultivo e utilizar de forma mais racional e eficiente as fontes de energia. Entretanto, isso não basta para preservar o ambiente terrestre a curto prazo. É preciso frear o crescimento da população humana por meio do planejamento familiar e do controle deliberado da natalidade.

Planejamento familiar e controle da natalidade

Até a década de 1970, em certos países considerava-se o controle de nascimentos uma tese racista, reacionária ou imperialista. Hoje, os cidadãos da maioria das nações consideram importante o controle da natalidade e do planejamento familiar como formas de manter a qualidade de vida da população. A maioria dos países desenvolvidos já conseguiu frear seu crescimento populacional. O mesmo tem ocorrido em alguns países em desenvolvimento, como a Tailândia, a Colômbia e a Costa Rica, que já conseguiram reduzir substancialmente suas taxas de natalidade. Outros, porém, apesar das tentativas, ainda não obtiveram o sucesso desejado.

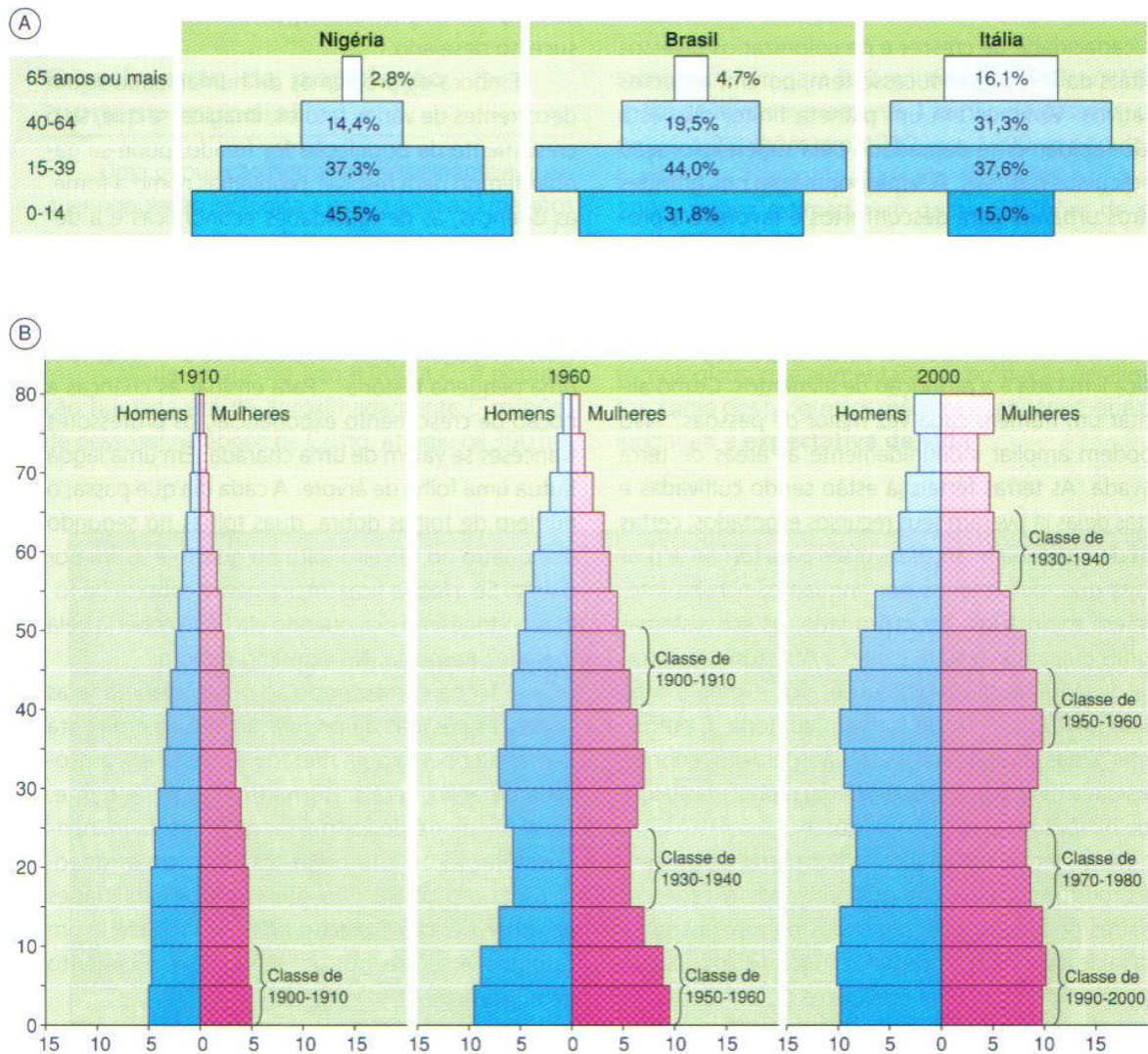
Embora os problemas da humanidade sejam decorrentes de vários fatores, imagina-se que, se o crescimento da população for freado, pode-se ganhar tempo para resolver problemas como a fome, as doenças, as desigualdades econômicas e a degradação ambiental, que seriam agravados pela superpopulação.

O escritor Lester Brown iniciou um de seus livros, *O vigésimo nono dia*, publicado em 1978, com uma pequena história: "Para ensinar às crianças a noção de crescimento exponencial, os professores franceses se valem de uma charada. Em uma lagoa flutua uma folha de árvore. A cada dia que passa, o número de folhas dobra: duas folhas no segundo dia, quatro no terceiro, oito no quarto e assim por diante. Se a lagoa ficar inteiramente coberta de folhas no trigésimo dia, quando ela ficou coberta pela metade? Resposta: No vigésimo nono dia".

A lagoa corresponde ao nosso planeta, e as folhas, às pessoas da população. Talvez o planeta já esteja coberto pela metade e, desta até a próxima geração, terá se tornado repleto de gente. O risco maior é deixar passar os sinais da iminente saturação ou interpretá-los de modo errôneo. O trigésimo dia já não oferecerá possibilidades de sobrevivência. É preciso não chegar a ele, e um caminho é, entre outros, limitar o crescimento demográfico.

Paradoxalmente, o aumento demográfico também está ligado ao grau de desenvolvimento no campo da saúde pública. A população cresce não apenas porque há mais nascimentos, mas também porque a duração média da vida humana tem aumentado. A expectativa de vida em 1650 era de 30 anos; hoje, a média mundial é de mais de 50 anos e, em países desenvolvidos, ultrapassa os 70 anos.

Pirâmides de idade

Uma análise importante da população humana refere-se à sua **composição em idades**, ou seja, quantas pessoas há em cada faixa etária, por exemplo, de 0 a 14 anos, de 15 a 39, de 40 a 64 e acima de 65 anos. A distribuição dos indivíduos de uma população por faixas de idade é expressa em gráficos conhecidos como **pirâmides de idade**, ou **pirâmides etárias**. **(Fig. 15.13**, na página seguinte**)** →

▲ **Figura 15.13** • **A.** Pirâmides de idade da Nigéria, do Brasil e da Itália, considerando quatro classes de idade. A base larga e o ápice estreito da pirâmide da Nigéria indicam, respectivamente, alta taxa de natalidade e alta taxa de mortalidade nas idades mais avançadas, o que dá um aspecto bem triangular ao gráfico. Na pirâmide da Itália, típica de países desenvolvidos, o gráfico tem base mais estreita e ápice mais largo, indicando, respectivamente, que há controle da natalidade e que a expectativa de vida é elevada. **B.** Pirâmides de idade dos EUA nos anos de 1910, 1960 e 2000 (projeção). Além de diversas classes de idade, a pirâmide também representa o número de homens e o de mulheres. Observe que as classes mais antigas vão "subindo" na pirâmide (acompanhe as classes de idade marcadas nos anos de 1910, 1960 e 2000). A análise dessas pirâmides permite fazer projeções sobre o crescimento futuro das populações.

Populações jovens, com alta taxa de crescimento, são representadas por gráficos que têm realmente forma de pirâmide, com a base mais larga que o ápice, o que indica elevada taxa de natalidade. Em populações que controlam a natalidade, o gráfico pode perder a forma de pirâmide, sendo a base, em certos casos, mais estreita que o ápice.

A análise de pirâmides de idade revela tendências do tipo de crescimento da população. Por exemplo, uma população com muitas pessoas na faixa de idade entre 0-14 anos (pirâmide com base larga) indica que, nos anos seguintes, grande número de pessoas entrará na idade reprodutiva, o que permite prever o crescimento da população num futuro próximo.

LEITURA

QUAL O TAMANHO DA MULTIDÃO?

Quantas pessoas cabem no mundo? Os países desenvolvidos encabeçarão o desastre? A queda na fertilidade irá afetar as aposentadorias?

Previsões sobre a população opõem ambientalistas e economistas, e põem uns analistas contra outros, como conta Warren Sanderson, do Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA). Ele é parte de uma equipe atacada recentemente pelo jornal *Wall Street* por apresentar como boa nova uma previsão de que o crescimento global da população humana poderá ser freado lá pelo fim de 2001. Sanderson explica a Liz Else por que essa polêmica questão precisa ser repensada.

Liz Else: *Qual é sua mais recente previsão para a população mundial?*

Warren Sanderson: Acreditamos que há 85% de chance de a população mundial atingir 9 bilhões de pessoas antes de 2100 e então diminuir.

Else: *E qual é a previsão da ONU?*

Sanderson: A ONU prevê um pico de 9,3 bilhões de pessoas em 2050, o que é 300 milhões a mais que nossa previsão.

Else: *Por que tal diferença?*

Sanderson: A previsão deles é mais alta devido a um problema com suas premissas básicas. A ONU calcula que todos os países terão futuramente a mesma taxa de fertilidade, da ordem de 2,1, pouco mais que o necessário para substituir a população [que morre]. Por exemplo, na Áustria a média de nascimentos por mulher é de 1,3; então, a ONU está esperando um enorme aumento na fertilidade austríaca, até chegar a 2,1. O outro lado da moeda é que muitos países desenvolvidos têm taxas de fertilidade altas, mas em queda. Na Coréia do Sul, por exemplo, é de 1,6. Na Tailândia, cerca de 1,8. Na verdade, não temos nenhum exemplo de país em que a taxa de fertilidade esteja subindo até atingir a barreira dos 2,1 e parando por aí. Em um importante encontro realizado pelo Conselho Nacional de Pesquisas dos Estados Unidos, entre o que há de melhor em previsão populacional, a expectativa é de que a fertilidade atual dos países em desenvolvimento poderá tornar-se semelhante à fertilidade atual dos países desenvolvidos.

A possibilidade de a população ir ao infinito ou a zero assusta os políticos

Else: *A ONU tem uma agenda?*

Sanderson: Não tenho certeza. Acreditamos que a ONU tem de desistir de suas premissas sobre fertilidade porque elas estão claramente erradas. Mas há aí também um fator político implícito. Se você estimar ingenuamente uma taxa de fertilidade acima de 2,1 e projetá-la para o futuro, sem mudanças, a população explodirá e irá ao infinito. Se você imaginar uma taxa menor que 2,1, a longo prazo a população tenderá a zero. A possibilidade de a população ir ao infinito ou ao zero as-

susta os políticos. No mundo real, as populações dos países não vão ao infinito ou ao zero porque elas se adaptam às circunstâncias. Apesar disso, em vez de se sentir confrontada com cenários que mostram populações explodindo ou encolhendo para sempre, a ONU acha mais fácil acreditar que as populações de todos os países no final se estabilizarão.

Else: Mas um declínio da população mundial é realmente uma boa notícia?

Sanderson: Maior crescimento populacional está ocorrendo em países pobres, no sul da Ásia e na África subsaariana. Entretanto, mesmo nesses locais o crescimento populacional é lento e pode cessar pelo fim de 2001 [ainda não há dados sobre se essa previsão se confirmou ou não]. Acho que essa é uma boa notícia para esses lugares. Temos ali uma combinação de governo pobre e recursos deteriorados, fome e guerras. Nesse contexto, qualquer pequena ação que possa aliviar um pouco a pressão sobre os recursos é uma ação boa. Mas fomos criticados pelo editorial do jornal *Wall Street* por termos dito isso. O jornal apelava para os horrores do controle populacional e da eliminação pura e simples da população.

Tem havido um longo e infeliz debate sobre população entre ambientalistas, de um lado, e economistas e gente da comunidade de negócios, do outro

Else: *Por que você acha que o jornal foi tão crítico?*

Sanderson: Tem havido um longo e infeliz debate sobre população entre ambientalistas, de um lado, e economistas e gente da comunidade de negócios, do outro. [Na década de 1960] Paul Erlich escreveu *The population bomb* [A bomba populacional], livro que falava sobre o crescimento futuro da população e dizia coisas como não haver esperanças para a Índia. Bem, a Índia não vai tão mal e, embora tenham nascido muitas pessoas desde então, também houve muito crescimento econômico. Então, houve uma forte reação nos Estados Unidos contra as previsões excessivamente pessimistas de alguns ambientalistas. Alguns economistas e pessoas da comunidade de negócios agora acham que não devemos nos preocupar com números [de pessoas] quando pensamos em desenvolvimento. Nenhuma dessas posições extremas representa uma visão realista do papel da população.

Else: *Você poderia falar mais sobre as técnicas de previsão da ONU?*

Sanderson: A ONU não utiliza a previsão probabilística, atualmente considerada o que há de melhor na previsão populacional. No IIASA, temos utilizado e implementado nossa própria versão [de método de previsão] desde 1996. A ONU confia no que chama de variante média, variante alta e variante baixa. Isso dá a você alguma idéia da incerteza. O problema é que o método é inconsistente do ponto de vista estatístico.

Else: *E o que você acha?*

Sanderson: A projeção média é o que eles pensam ser o mais provável de ocorrer. Para chegar à variante alta, teríamos de aumentar a fertilidade um bocado. Para chegar à variante baixa, a fertilidade também teria de cair muito. Há dois problemas com isso. Um é que eles não lidam com a mortalidade. O assunto também envolve a incerteza quanto à migração, e não só quanto à fertilidade. O segundo problema é que suas previsões levam em conta a incerteza, mas de modo muito artificial, porque não há cálculos probabilísticos associados às variantes alta e baixa.

Else: *E isso não é um tanto rudimentar?*

Sanderson: Pior que isso. Do ponto de vista probabilístico não tem sentido, porque eles realmente não agregam informações sobre as incertezas nas previsões. Há também um

problema quando eles passam de um país para uma região e de uma região para o mundo inteiro. Para chegar à variante alta do mundo, eles aumentam essa variante para todos os países. Agora, não há razão especial pela qual a variante alta para o mundo tenha de ser alta para o Brasil e também para a China. [...] Nada disso representa corretamente a incerteza do processo.

Else: *Então, por que a ONU segue esse caminho?*

Sanderson: A ONU está encarregada de fazer previsões regulares sobre cerca de 200 países e territórios, o que é uma tarefa muito difícil, e seus métodos têm muitas simplificações. Isso não é bom, e acreditamos que há maneiras melhores de fazer. O caminho seria mudar para modelos probabilísticos; então, construir cenários de população alta e baixa poderia fazer sentido.

A ONU está encarregada de fazer previsões regulares sobre cerca de 200 países e territórios

Else: *O que é pior, crescimento ou declínio?*

Sanderson: No Instituto, temos trabalhado em uma nova linha de pensamento: o balanço populacional. Ele leva em conta o ambiente, a criatividade humana — que pode desenvolver novas tecnologias — e o ciclo de vida humano, o que é muito importante. O balanço populacional enfatiza que, enquanto o crescimento acelerado pode ser problema em certos lugares, em outros o problema é justamente o rápido declínio e envelhecimento da população. Então, o balanço populacional é uma maneira de pensar sobre o que seria melhor para cada população. Nossas previsões populacionais baseiam-se em dados reais, e nosso modelo de balanço é só uma ferramenta para uma compreensão que combine as melhores partes dos argumentos de ambientalistas e economistas. Vamos apresentar alguns números reais em breve e temos um livro planejado.

Else: *Que outras previsões há?*

Sanderson: [...] Queremos ter certeza de que as questões sobre a população mereçam atenção no Encontro de Joanesburgo[1] sobre o planeta, que sucederá o encontro no Rio de Janeiro [Eco-92]. Minha visão sobre o encontro no Rio foi que, por causa do debate improdutivo sobre crescimento populacional, as pessoas saíram dizendo: "Esses caras não sabem o que falam: ou não devemos nos preocupar com números ou é exatamente o oposto". O que gostaríamos de dizer às pessoas é: "Não se preocupem com coisas com as quais não têm de se preocupar, mas preocupem-se com as coisas que realmente têm a ver".

[1] O Encontro de Joanesburgo, também conhecido como Rio+10, ou II Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, aconteceu em setembro de 2002 naquela cidade da África do Sul. Teve como principal objetivo tentar acelerar a aplicação da agenda ecológica mundial, definida na chamada Eco-92, ocorrida dez anos antes no Rio de Janeiro.

• **Fonte:** Entrevista realizada por Liz Else com Warren Sanderson, do Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) em *New Scientist*, vol. 171, n. 2.307, 2001, p. 42. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

15.1 Características das populações

1. Defina população biológica e explique por que seu estudo é importante em Ecologia.
2. O que é densidade populacional? E densidade demográfica? Exemplifique.
3. O que é taxa de crescimento absoluto de uma população?
4. O que é taxa de crescimento relativo de uma população? Exemplifique.
5. Quais são os fatores que determinam o crescimento de uma população?
6. Como se costumam expressar as taxas de natalidade e de mortalidade para a espécie humana?
7. O que é índice de fertilidade? Qual é sua importância para as projeções de crescimento populacional?
8. O que é potencial biótico de uma população?
9. O que é resistência do meio?

15.2 Fatores que regulam o tamanho de populações biológicas

10. O que é carga biótica máxima de um ambiente?
11. O que diz, em linhas gerais, o princípio da exclusão competitiva enunciado por Gause?

15.3 Oscilações em populações naturais

12. Quais são os principais fatores ambientais que limitam o crescimento de uma população?

Quadro 15.1 AS POPULAÇÕES HUMANAS

13. O que são pirâmides de idade? Como variam essas pirâmides para diferentes tipos de população e o que as variações indicam?

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

14. A população da China é de 1,277 bilhão de pessoas em um território de 9,597 milhões de quilômetros quadrados. Pode-se dizer que a densidade demográfica desse país é (da ordem de)
a) 18 hab./km².
b) 133 hab./km².
c) 463 hab./km².
d) impossível de se calcular com os dados disponíveis.

15. A taxa de crescimento relativo de uma população difere da taxa de crescimento absoluto por levar em conta a(o)
a) resistência do meio.
b) tamanho do território.
c) tamanho populacional.
d) taxa de mortalidade infantil.

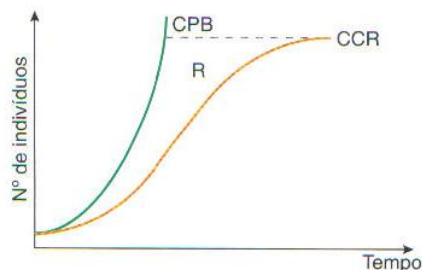
Considere os seguintes fatores relativos a uma população biológica para responder às questões 16 e 17.
a) Emigração.
b) Imigração.
c) Mortalidade.
d) Natalidade.

16. Qual(ais) fator(es) contribui(em) para o aumento da densidade populacional?
17. Qual(ais) fator(es) contribui(em) para a redução do tamanho populacional?

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 18 a 21.
a) Curva de crescimento.
b) Pirâmide etária.
c) Potencial biótico.
d) Resistência do meio.

18. Que forma de representação mostra a variação do tamanho da população ao longo do tempo?
19. Como se denomina a capacidade que uma população tem de crescer?
20. Que representação gráfica mostra a distribuição dos indivíduos de uma população por faixas de idade?
21. Como se denomina o conjunto de fatores ambientais que restringem o crescimento populacional?

QUESTÕES DISCURSIVAS

22. Analise as curvas do gráfico a seguir e discuta a relação entre resistência do meio (R), potencial biótico (CPB) e crescimento real (CCR).

23. A tabela a seguir refere-se a uma população experimental inicialmente constituída por 100 indivíduos, machos e fêmeas, analisada por um período de seis anos. Utilize os dados da tabela para responder às questões.

Variação do nº de indivíduos causada por	Tempo (em anos)					
	1	2	3	4	5	6
Nascimento	48	65	102	149	128	110
Imigração	4	19	21	10	2	1
Morte	10	12	20	35	65	75
Emigração	2	1	2	3	45	40

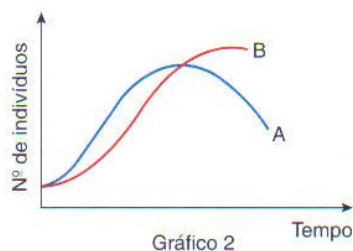
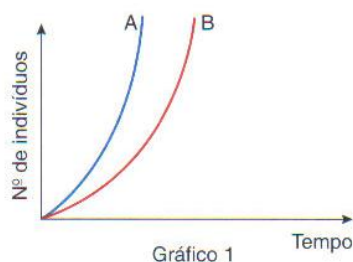
a) Calcule, ano a ano, o tamanho da população, considerando os dados de nascimento, morte, imigração e emigração (lembre-se de que a população inicial era de 100 indivíduos). A seguir, construa um gráfico para representar o crescimento da população, relacionando o número de indivíduos (no eixo das ordenadas) e o tempo decorrido (no eixo das abscissas).

b) Considere que a população ocupe uma área de um quilômetro quadrado. Calcule, ano a ano, a densidade populacional. A seguir, construa um gráfico de barras verticais, em que o comprimento de cada barra represente o valor da densidade populacional. Consulte sua professora ou seu professor sobre a melhor maneira de construir esse tipo de gráfico.

c) Com base na análise dos dados e dos gráficos construídos, redija um pequeno texto que descreva a dinâmica dessa população considerando os fatores analisados (natalidade, mortalidade, imigração, emigração, crescimento populacional e densidade).

24. Duas espécies diferentes, A e B, foram objeto da seguinte experiência: em um primeiro momento, foram criadas em ambientes separados e para ambas foram fornecidas condições ótimas de sobrevivência, obtendo-se os dados lançados no gráfico 1. Em um segundo momento, as duas espécies foram reunidas em um mesmo ambiente que oferecia condições ótimas para ambas, obtendo-se os dados lançados no gráfico 2. O que se pode concluir com base na análise comparativa dos gráficos 1 e 2?

Gráfico 1

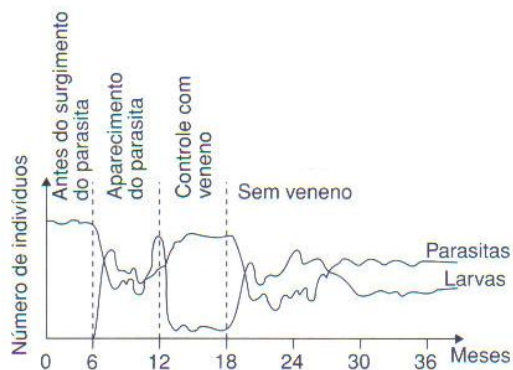
Gráfico 2

25. Utilize os dados a seguir para construir as pirâmides de idade de dois países, identificados como A e B.

País A	
Faixa etária	**Porcentagem**
0-14 anos	40,6
15-39 anos	39,3
40-64 anos	16,4
acima de 65 anos	3,8

País B	
Faixa etária	**Porcentagem**
0-14 anos	18,8
15-39 anos	33,3
40-64 anos	30,6
acima de 65 anos	17,3

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

26. (Enem-MEC) Um produtor de larvas aquáticas para alimentação de peixes ornamentais usou veneno para combater parasitas, mas suspendeu o uso do produto quando os custos se revelaram antieconômicos.
O gráfico registra a evolução das populações de larvas e parasitas:

O aspecto BIOLÓGICO, ressaltado a partir da leitura do gráfico, que pode ser considerado o melhor argumento para que o produtor não retome o uso do veneno é:

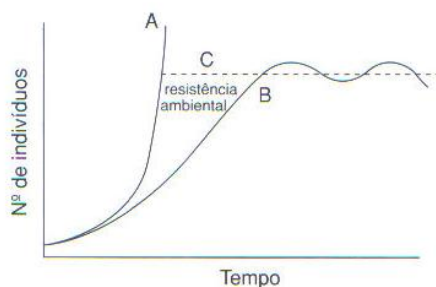
a) A densidade populacional das larvas e dos parasitas não é afetada pelo uso do veneno.
b) A população de larvas não consegue se estabilizar durante o uso do veneno.
c) As populações mudam o tipo de interação estabelecida ao longo do tempo.
d) As populações associadas mantêm um comportamento estável durante todo o período.
e) Os efeitos das interações negativas diminuem ao longo do tempo, estabilizando as populações.

27. (Vunesp) O risco de extinção de uma espécie está relacionado com seu tamanho populacional, com sua área de distribuição e com o grau de especificidade de seus hábitats e hábitos alimentares. Analise o quadro, que apresenta oito espécies, numeradas de 1 a 8, que são caracterizadas pela combinação desses fatores:

	DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA AMPLA		DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA RESTRITA	
TAMANHO POPULACIONAL	Ocupa hábitats muito específicos e tem dieta bem restrita	Ocupa hábitats variados e tem dieta muito ampla	Ocupa hábitats muito específicos e tem dieta bem restrita	Ocupa hábitats variados e tem dieta muito ampla
Populações pequenas	Espécie 1	Espécie 2	Espécie 3	Espécie 4
Populações grandes	Espécie 5	Espécie 6	Espécie 7	Espécie 8

Com base nas características combinadas no quadro, pode-se afirmar que as espécies que apresentam maior e menor risco de extinção são, respectivamente,

a) 1 e 8. b) 1 e 4. c) 4 e 5. d) 2 e 6. e) 3 e 6.

28. (UFPE-Adaptado) Analise a figura adiante, relativa ao tema crescimento das populações biológicas, correlacionando-a com as proposições dadas. Indique se as proposições são verdadeiras (V) ou falsas (F).

a) A curva A ilustra o crescimento de uma população biológica avaliado em ambiente que impõe restrições ao desenvolvimento dela.
b) A curva sigmóide, mostrada em B, ilustra o potencial biótico de uma população biológica.
c) C indica o tamanho populacional que o ambiente suporta.
d) A curva B ilustra o crescimento real de uma população biológica, considerando a resistência ambiental.
e) A curva A ilustra o potencial biótico de uma população. Fatores como disponibilidade de alimento, parasitismo, predatismo etc. não influenciam.

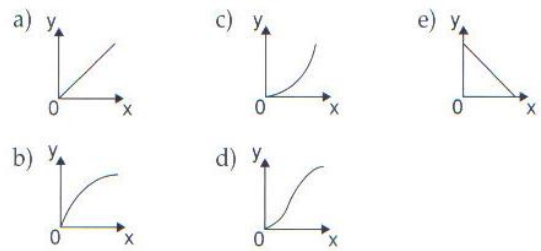
29. (PUC-Campinas-SP) Nos gráficos a seguir, a variável tempo está indicada no eixo x e o número de drosófilas, no eixo y. Assinale a alternativa correspondente ao gráfico que representa corretamente o crescimento de uma população de drosófilas mantidas em meio de cultura adequado, sem restrições de nutrição, aeração e espaço.

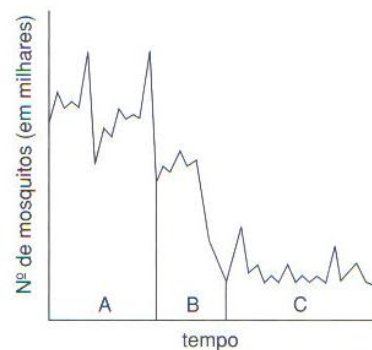
a)

c)

e)

b)

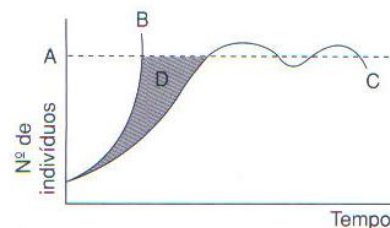
d)

30. (Fatec-SP) Manhoso, melindroso, dengoso são sinônimos de dengue, pois as pessoas com essa virose ficam indispostas e prostradas. O vírus da dengue é transmitido pela picada da fêmea do mosquito *Aedes aegypti*, cujos ovos são depositados em águas estagnadas. O combate ao mosquito deve ser feito com uso de inseticida e eliminação de possíveis criadouros das larvas, como pneus velhos, vasos com água, caixas-d'água descobertas, etc.

O gráfico a seguir representa a ação efetiva de combate aos mosquitos:

Um estudante, analisando o gráfico, fez três afirmações:

I. No intervalo A, a população de mosquitos estava em equilíbrio com o meio ambiente.
II. No intervalo B, pode-se concluir que as medidas profiláticas, no combate aos mosquitos, tiveram um resultado bastante positivo.
III. No intervalo C, a população de mosquitos voltou ao equilíbrio inicial com o meio, recuperando-se após terem passado os efeitos das medidas profiláticas.

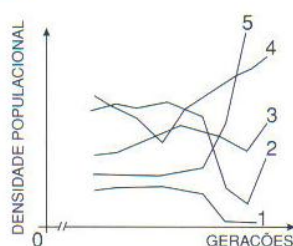
Quanto às afirmações do estudante, somente

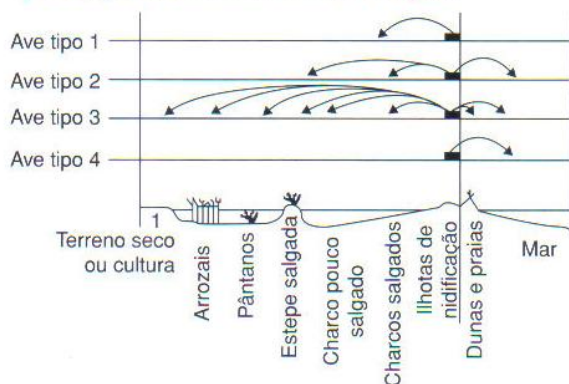
a) I e III estão corretas.
b) I e II estão corretas.
c) I está correta.
d) II está correta.
e) III está correta.

31. (Fatec-SP) No gráfico abaixo as letras A, B, C e D representam, respectivamente:

a) A - Carga biótica; B - Resistência do meio; C - Potencial biótico; D - Crescimento real.

b) A - Carga biótica; B - Potencial biótico; C - Crescimento real; D - Resistência do meio.
c) A - Carga biótica; B - Crescimento real; C - Potencial biótico; D - Resistência do meio.
d) A - Potencial biótico; B - Carga biótica; C - Crescimento real; D - Resistência do meio.
e) A - Resistência do meio; B - Potencial biótico; C - Crescimento real; D - Carga biótica.

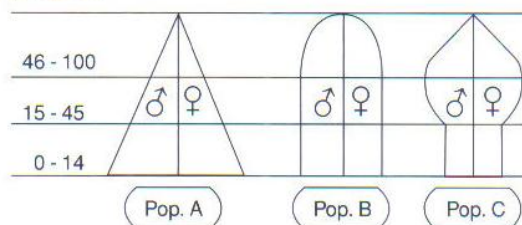
32. (UFSM-RS) Escolha a alternativa que completa a frase a seguir: ( ) e ( ) aumentam o tamanho de uma população.
a) Natalidade - emigração
b) Mortalidade - emigração
c) Mortalidade - imigração
d) Emigração - imigração
e) Natalidade - imigração

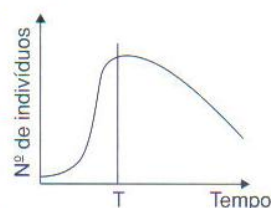
33. (UERJ) Traíras são predadoras naturais dos lambaris. Acompanhou-se, em uma pequena lagoa, a evolução da densidade populacional dessas duas espécies de peixes. Tais populações, inicialmente em equilíbrio, sofreram notáveis alterações após o início da pesca predatória da traíra, na mesma lagoa.
Esse fato pode ser observado no gráfico abaixo, em que a curva 1 representa a variação da densidade populacional da traíra.

A curva que representa a variação da densidade populacional de lambaris é a de número
a) 2. b) 3. c) 4. d) 5.

34. (Enem-MEC) O esquema a seguir representa os diversos meios em que se alimentam aves, de diferentes espécies, que fazem ninho na mesma região.

Com base no esquema, uma classe de alunos procurou identificar a possível existência de competição alimentar entre essas aves e concluiu que

a) não há competição entre os quatro tipos de aves porque nem todas elas se alimentam nos mesmos locais.
b) não há competição apenas entre as aves dos tipos 1, 2 e 4 porque retiram alimentos de locais exclusivos.
c) há competição porque a ave do tipo 3 se alimenta em todos os lugares e, portanto, compete com todas as demais.
d) há competição apenas entre as aves 2 e 4 porque retiram grande quantidade de alimentos de um mesmo local.
e) não se pode afirmar se há competição entre as aves que se alimentam em uma mesma região sem conhecer os tipos de alimento que consomem.

35. (Enem-MEC) Ao longo do século XX, a taxa de variação na população do Brasil foi sempre positiva (crescimento). Essa taxa leva em consideração o número de nascimentos (N), o número de mortes (M), o de emigrantes (E) e o de imigrantes (I) por unidade de tempo.
É correto afirmar que, no século XX,
a) $M > I + E + N$.
b) $N + I > M + E$.
c) $N + E > M + I$.
d) $M + N < E + I$.
e) $N < M - I + E$.

36. (Fuvest-SP) Os gráficos a seguir representam diferentes estruturas etárias de populações humanas. O eixo vertical indica idade e o eixo horizontal, número de indivíduos.

A população em expansão é
a) A, já que os adultos em idade reprodutiva e os idosos são mais numerosos do que as crianças.
b) A, já que o número de crianças é maior do que o de adultos em idade reprodutiva.
c) B, já que o número de adultos em idade reprodutiva e de crianças é praticamente igual.
d) C, já que os adultos em idade reprodutiva são mais numerosos do que as crianças.
e) C, já que o número de pessoas idosas é maior do que o de adultos em idade reprodutiva.

37. (Fuvest-SP) Uma pequena quantidade da levedura *Saccharomyces cerevisae* foi inoculada em um tubo de ensaio, contendo meio apropriado. O desenvolvimento dessa cultura está representado no gráfico.

Para explicar o comportamento da população de leveduras, após o tempo T, foram levantadas três hipóteses:

1 - A cultura foi contaminada por outro tipo de microorganismo originando competição, pois o esperado seria o crescimento contínuo da população de leveduras.

2 - O aumento no número de indivíduos provocou diminuição do alimento disponível, afetando a sobrevivência.

3 - O acúmulo dos produtos excretados alterou a composição química do meio, causando a morte das leveduras.

Entre as três hipóteses, podemos considerar plausível(eis) apenas

a) 1. b) 2. c) 3. d) 1 e 2. e) 2 e 3.

38. (Enem-MEC) No início deste século, com a finalidade de possibilitar o crescimento da população de veados no planalto de Kaibab, no Arizona (EUA), moveu-se uma caçada impiedosa aos seus predadores — pumas, coiotes e lobos. No gráfico a seguir, a linha cheia indica o crescimento real da população de veados, no período de 1905 a 1940; a linha pontilhada indica a expectativa quanto ao crescimento da população de veados, nesse mesmo período, caso o homem não tivesse interferido em Kaibab.

Para explicar o fenômeno que ocorreu com a população de veados após a interferência do homem, um estudante elaborou as seguintes hipóteses e/ou conclusões:

I. lobos, pumas e coiotes não eram, certamente, os únicos e mais vorazes predadores dos veados; quando esses predadores, até então despercebidos, foram favorecidos pela eliminação de seus competidores, aumentaram numericamente e quase dizimaram a população de veados;

II. a falta de alimentos representou para os veados um mal menor que a predação;

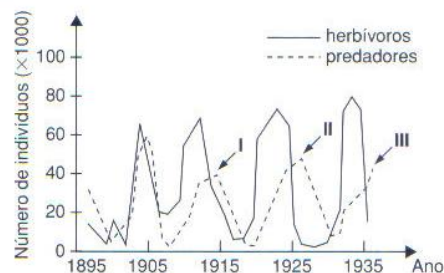
III. ainda que a atuação dos predadores pudesse representar a morte para muitos veados, a predação demonstrou-se um fator positivo para o equilíbrio dinâmico e sobrevivência da população como um todo;

IV. a morte dos predadores acabou por permitir um crescimento exagerado da população de veados. Isso levou à degradação excessiva das pastagens, tanto pelo consumo excessivo como pelo seu pisoteamento.

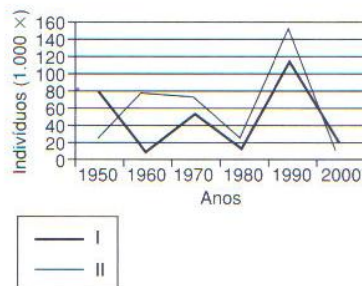
O estudante acertou se indicou as alternativas:

a) I, II, III e IV.
b) I, II e III, apenas.
c) I, II e IV, apenas.
d) II e III, apenas.
e) III e IV, apenas.

QUESTÕES DISCURSIVAS

39. (Fuvest-SP) O gráfico a seguir representa o crescimento de uma população de herbívoros e da população de seus predadores:

a) Pela análise do gráfico, como se explica o elevado número de predadores nos pontos I, II e III? Justifique sua resposta.

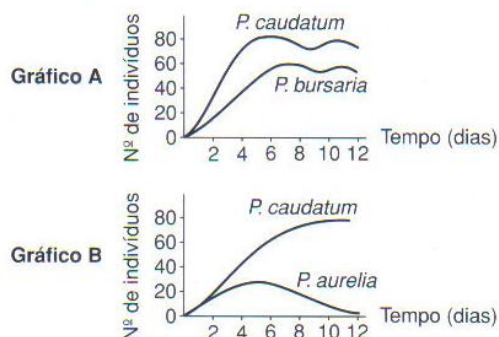
b) Se, a partir de 1935, os predadores tivessem sido retirados da região, o que se esperaria que acontecesse com a população de herbívoros? Justifique sua resposta.

40. (UFV) O gráfico abaixo representa a variação do tamanho populacional, ao longo de 50 anos, de uma espécie de carnívoro (I) e a de um roedor (II) que vivem em uma mata natural. Analise o gráfico e responda às questões seguintes.

a) As oscilações de duas populações como as observadas no gráfico sugerem qual tipo de relação ecológica?

b) Cite dois exemplos de animais cujas populações poderão representar no gráfico os números I e II, respectivamente.

c) Qual a importância da existência desse tipo de relação para as comunidades da mata?

d) O que poderá acontecer com o número de indivíduos das duas populações, se for considerado que a região será desmatada?

41. (UFSCar-SP) Os gráficos mostram os resultados das curvas de crescimento das espécies *Paramecium caudatum* e *Paramecium bursaria* (gráfico A) e das espécies *Paramecium caudatum* e *Paramecium aurelia* (gráfico B), quando essas espécies foram cultivadas no mesmo frasco.

Analisando os gráficos, responda:

a) O que se pode dizer dos nichos ecológicos explorados pelas espécies de *Paramecium* constantes dos gráficos A e B?

b) Como se explicam os resultados das curvas de crescimento das espécies *Paramecium caudatum* e *Paramecium bursaria* (gráfico A), quando cultivadas no mesmo frasco?

42. (Fuvest-SP)

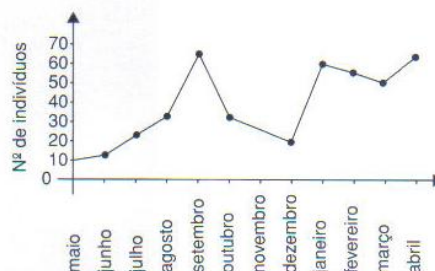
a) Apesar de o predatismo ser descrito como uma interação positiva para o predador e negativa para a presa, pode-se afirmar que os predadores têm um efeito positivo sobre a população de presas. Explique como uma população de presas pode ser beneficiada por seus predadores.

b) Alguns ecologistas consideram os herbívoros comedores de sementes como predadores das populações de plantas que lhes fornecem alimento. Já os herbívoros que se alimentam apenas de folhas são considerados parasitas das plantas que comem. Justifique essas classificações.

43. (Unicamp-SP) Alguns moluscos têm importância sanitária. Um exemplo comprovado é o do planorbídeo *Biomphalaria glabrata*, que está relacionado ao ciclo de uma doença que atinge os humanos. Por outro lado, ainda não foi comprovado se *Acathina fulica* está relacionada com a incidência de meningoencefalite. Esse gastrópode foi introduzido no Brasil, sem estudos prévios, visando substituir com vantagens o "escargot" (molusco utilizado como alimento).

a) A qual doença os caramujos *Biomphalaria* estão relacionados? Qual o papel dos caramujos no ciclo dessa doença? Em que ambiente ocorre a contaminação dos humanos?

b) *Acathina fulica* está aumentando rapidamente e está destruindo a vegetação de algumas regiões. Dê uma explicação possível, do ponto de vista ecológico, para essa proliferação.

44. (UFSCar-SP) Um estudante anotou as alterações ocorridas em uma população de camundongos, no período de maio de um ano a abril do ano seguinte, numa área rural, e obteve o gráfico seguinte.

a) Qual período indica taxa de natalidade maior que a taxa de mortalidade? O que está acontecendo com a população nesse período?

b) Cite dois prováveis fatores que podem ter causado a diminuição da densidade nessa população de camundongos, no período de setembro a dezembro.

CAPÍTULO

16 RELAÇÕES ECOLÓGICAS ENTRE SERES VIVOS

As joaninhas são insetos predadores de outros insetos, no caso da foto, pulgões de plantas.

16.1 Tipos de relação ecológica

Os organismos de uma comunidade biológica interagem entre si. Essas interações, denominadas genericamente **relações ecológicas**, costumam ser classificadas pelos biólogos em intra-específicas e interespecíficas. **Relações intra-específicas** são as que se estabelecem entre indivíduos de mesma espécie, enquanto **relações interespecíficas** são as que se estabelecem entre indivíduos de espécies diferentes. A tabela 16.1 apresenta um resumo das relações ecológicas que estudaremos neste capítulo. **(Tab. 16.1)**

16.2 Relações intra-específicas

Organismos de mesma espécie quase sempre disputam recursos do meio; há situações, entretanto, em que eles se auxiliam mutuamente, trocando benefícios. No primeiro caso, fala-se em **competição intra-específica** e, no segundo, em **cooperação intra-específica**.

Competição intra-específica

Competição intra-específica é a disputa, entre indivíduos de mesma espécie, por um ou mais recursos do ambiente. Dependendo da espécie, pode ocorrer competição por água, alimento, minerais, luz, locais para construir os ninhos, parceiros para reprodução etc.

TABELA 16.1 • Principais relações ecológicas

Relações intra-específicas	**Colônias**: indivíduos unidos, atuando em conjunto; às vezes repartem funções. Ex.: corais.
	Sociedades: indivíduos independentes, organizados cooperativamente. Ex.: abelhas.
	Competição intra-específica: indivíduos concorrem pelos mesmos recursos do meio. Esse tipo de relação existe em praticamente todas as espécies.
Relações interespecíficas	**Protocooperação**: indivíduos associados se beneficiam e a associação não é obrigatória. Ex.: caranguejo-eremita e anêmona-do-mar.
	Inquilinismo: indivíduo usa outro como moradia, sem prejudicá-lo. Ex.: plantas epífitas sobre árvores.
	Herbivoria: animais (herbívoros) devoram plantas inteiras ou parte delas. Ex.: gado, que se alimenta de capim.
	Predação: animais (carnívoros) matam e devoram outros animais. Ex.: gavião, que devora outros pássaros e roedores.
	Competição interespecífica: indivíduos com nichos ecológicos similares competem por recursos do meio. Ex.: animais que se alimentam do mesmo tipo de planta.
	Comensalismo: indivíduo usa restos da alimentação de outro, sem prejudicá-lo. Ex.: hienas, que aproveitam restos das presas dos leões.
	Mutualismo: indivíduos associados se beneficiam e a associação é fundamental à sobrevivência de ambos. Ex.: algas e fungos que formam liquens.
	Parasitismo: indivíduo vive à custa de outro, causando prejuízos, geralmente sem levar à morte. Ex.: lombrigas que parasitam o intestino humano.

Além da luta física por alimento ou por parceiros de reprodução, a competição pode manifestar-se de outras formas. Por exemplo, se um animal é muito ativo na procura de alimento, ele tende a levar vantagem competitiva sobre outro mais lento, principalmente se o alimento for escasso. Plantas podem competir por água e por nutrientes disponíveis no solo, e também por locais onde a luminosidade seja mais adequada. Em certas regiões desérticas, por exemplo, observa-se uma distribuição espaçada dos indivíduos de certas populações de plantas. Isso se deve à competição pelo suprimento de água no solo, que faz as plantas manterem uma distância entre si, distribuindo-se com certa homogeneidade na área ocupada pela população. **(Fig. 16.1)**

▲ **Figura 16.1** • A competição entre plantas do deserto por água leva à distribuição espaçada dos indivíduos da população.

Cooperação intra-específica: colônias e sociedades

Colônias

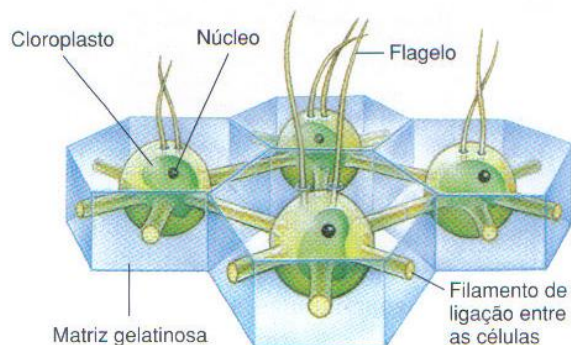
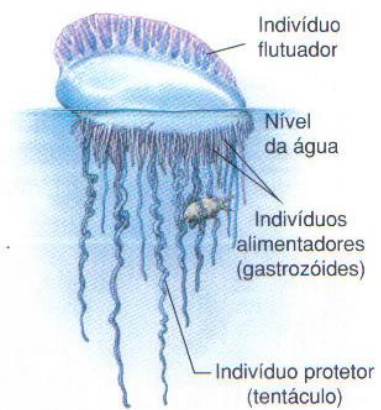
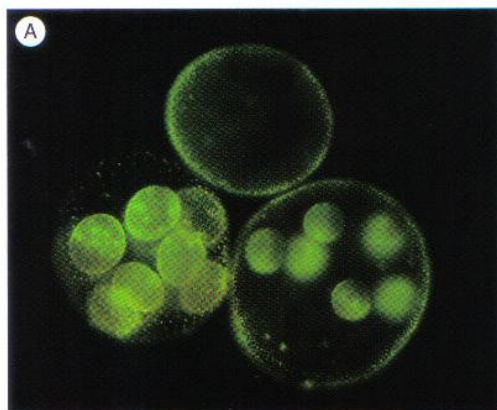
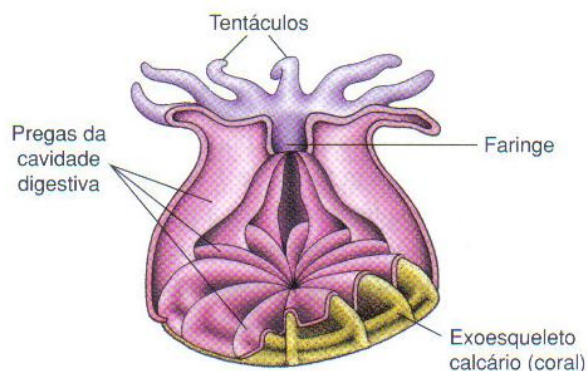
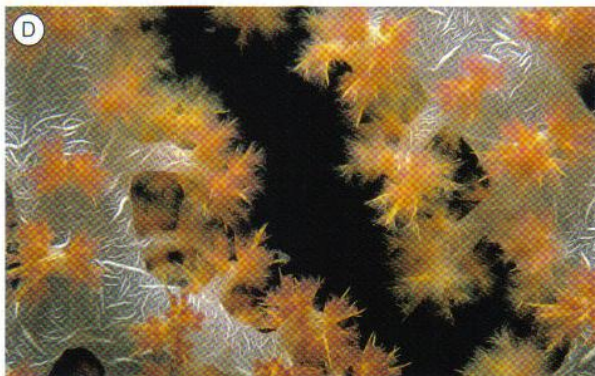
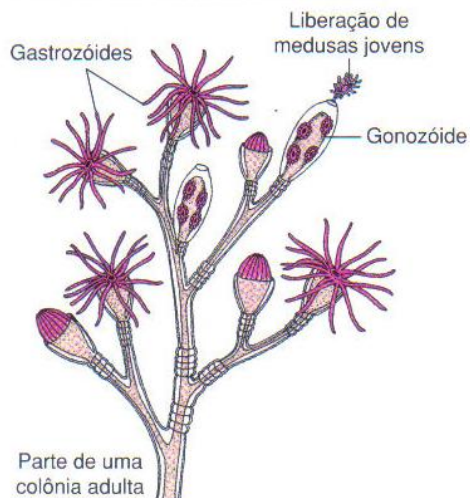
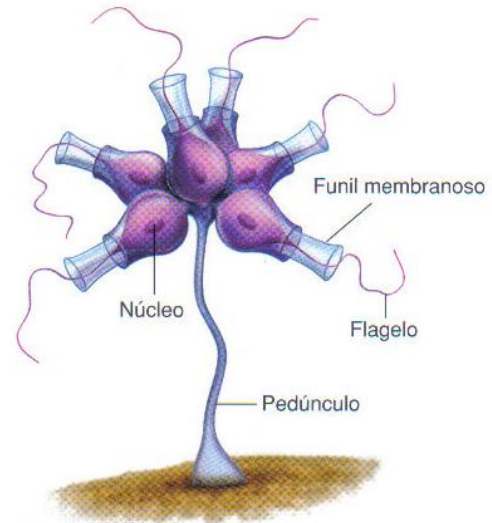
Uma das formas de cooperação intra-específica é a **colônia**, em que indivíduos de mesma espécie vivem agrupados, interagindo de forma mutuamente vantajosa. Entre os componentes de uma colônia há sempre divisão de trabalho, cujo grau varia de acordo com a espécie.

A complexidade das colônias e a maneira pela qual seus componentes dividem as tarefas de sobrevivência variam. Por exemplo, diversos tipos de bactéria formam colônias relativamente simples, em que um conjunto de indivíduos semelhantes compartilha uma massa gelatinosa, produzida pela colaboração de todos. Outras colônias são bastante complexas, sendo formadas por indivíduos especializados, que repartem funções e podem ser bem diferentes uns dos outros. Quando os indivíduos de uma colônia são semelhantes, fala-se em **colônia isomorfa** (do grego *isos*, igual, semelhante, e *morpho*, forma); quando a colônia é constituída por indivíduos diferentes entre si, fala-se em **colônia heteromorfa** (do grego *heteros*, diferente).

A alga colonial *Volvox*, que vive em água doce, é um exemplo de colônia heteromorfa. Colônias dessa alga podem conter mais de 1.000 indivíduos unicelulares biflagelados, dispostos lado a lado, formando uma esfera oca. Dentro dessa esfera há indivíduos sem flagelos, capazes de originar, assexuadamente, colônias menores que ficam contidas por certo tempo no interior da colônia-mãe.

Outro exemplo de colônia heteromorfa é o cnidário *Physalia pelagica*, conhecido como caravela-portuguesa. A colônia é constituída por indivíduos de vários tipos. Um deles, o indivíduo flutuador, é uma bolsa cheia de gás, cuja função é manter a colônia flutuando; outros indivíduos têm boca e cavidade digestória, sendo responsáveis pela alimentação da colônia; outros, ainda, tornaram-se alongados e ricos em células urticantes, formando os longos tentáculos da caravela, que atuam na captura de presas e na proteção da colônia. Nesse cnidário, os indivíduos da colônia apresentam tal especialização e divisão de funções que praticamente se comportam como um organismo individual.

Outro cnidário que apresenta colônia heteromorfa é a *Obelia*, em que existem indivíduos alimentadores, chamados de gastrozóides, e indivíduos reprodutores, chamados de gonozóides. Relembre esses cnidários no capítulo 10 do volume 2 desta coleção.

Também há cnidários que apresentam colônias isomorfas. Os **corais**, por exemplo, constroem um esqueleto calcário compartilhado por centenas, milhares ou milhões de indivíduos muito semelhantes. Na Austrália, as colônias de corais formam um imenso recife chamado de Grande Barreira de Corais, com mais de 2.000 km de extensão. **(Fig. 16.2)**

▲ **Figura 16.2** • Exemplos de organismos coloniais. **A.** Colônias da alga verde *Volvox* fotografadas ao microscópio óptico (aumento ≃ 100×). Embaixo, representação dos indivíduos biflagelados que formam a porção periférica da colônia. **B.** O cnidário colonial *Physalia* é constituído por indivíduos altamente integrados, como mostra a ilustração à direita. **C.** (página seguinte) Colônia do cnidário *Obelia*, com indivíduos alimentadores (gastrozóides) e reprodutores (gonozóides), como mostra a ilustração abaixo. **D.** (página seguinte) Pólipos vivos formadores de um coral, fotografados de cima. Abaixo, representação de um pólipo coralíneo cortado para mostrar seu interior.

Organismos unicelulares coloniais, como *Volvox* e outros, sugerem que um primeiro passo rumo à origem dos seres multicelulares pode ter sido a organização colonial. **(Fig. 16.3)**

▲ **Figura 16.3** • O protozoário coanoflagelado colonial *Codosiga* é considerado por muitos biólogos um exemplo do que pode ter ocorrido nos primórdios da evolução da multicelularidade na linhagem que originou as esponjas, dotadas de células semelhantes às dos coanoflagelados.

Sociedades

Sociedades são grupos de organismos de mesma espécie em que os indivíduos apresentam algum grau de cooperação, comunicação e divisão de trabalho, conservando relativa independência e mobilidade. Estas últimas características distinguem sociedade de colônia, na qual os indivíduos são fisicamente unidos. Diversas espécies, inclusive a nossa, vivem em sociedade. Exemplos de sociedades altamente organizadas são encontrados nos insetos sociais das ordens Hymenoptera (abelhas, formigas e vespas) e Isoptera (cupins).

A sociedade das abelhas

Uma colméia de abelhas é uma sociedade que pode reunir entre 50 e 100 mil indivíduos, incapazes de sobreviver senão no grupo social. Em colméias de abelhas da espécie *Apis mellifera*, as funções dos indivíduos são muito bem definidas, havendo três **castas sociais**: rainha, zangão e operária. A rainha é uma fêmea fértil, diplóide, cuja função é procriar e originar todos os indivíduos da colméia. Zangões são os machos, de constituição haplóide, que não possuem ferrão nem estruturas de trabalho, tendo como única função a fecundação de rainhas virgens. Operárias são fêmeas diplóides estéreis, que exercem diversas funções, como produzir os favos de cera e o mel, limpar e guardar a colméia, recolher néctar e pólen das flores etc.

A rainha, ao se tornar sexualmente madura, voa e acasala-se no ar com diversos zangões, armazenando os espermatozóides de todos eles em seus receptáculos seminais. A seguir, ela retorna à colônia e começa a pôr ovos, depositando cada um dentro de uma célula hexagonal de cera construída pelas operárias.

A rainha pode pôr dois tipos de ovo: não-fecundado e fecundado. Ovos não-fecundados desenvolvem-se por um fenômeno conhecido como **partenogênese** (do grego *partenós*, virgem, não-fecundado, e *genesis*, origem), originando machos haplóides com cromossomos exclusivamente maternos. Os ovos fecundados desenvolvem-se em fêmeas diplóides. Estas podem ser operárias ou rainhas, dependendo do tipo de alimentação que recebem na fase larval. Larvas de operárias e de zangões são alimentadas principalmente com mel, enquanto certas larvas, alimentadas com uma substância especial, a geléia real, transformam-se em rainhas. Ao atingir a maturidade sexual, as jovens rainhas abandonam a colméia, seguidas por um pequeno séqüito de operárias e zangões, no chamado vôo nupcial. Cada rainha fecundada e as operárias acompanhantes podem fundar uma nova colméia, enquanto os zangões morrem após a cópula. **(Fig. 16.4)**

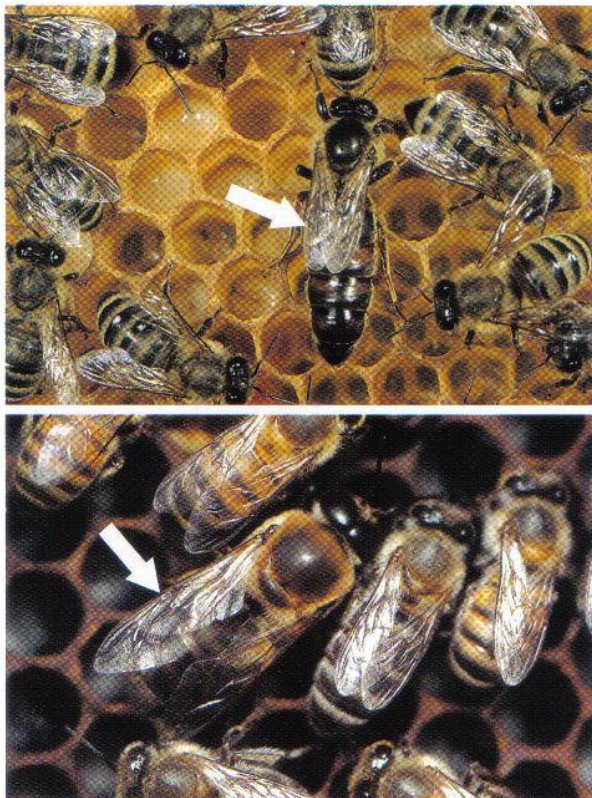



Figura 16.4 • A abelha *Apis mellifera* forma colônias complexas, em que as tarefas são repartidas com extrema organização entre os indivíduos, a ponto de alguns cientistas considerarem a colméia um "superorganismo". Na foto superior, a seta aponta uma rainha, cercada de operárias; na foto inferior, a seta aponta um zangão.

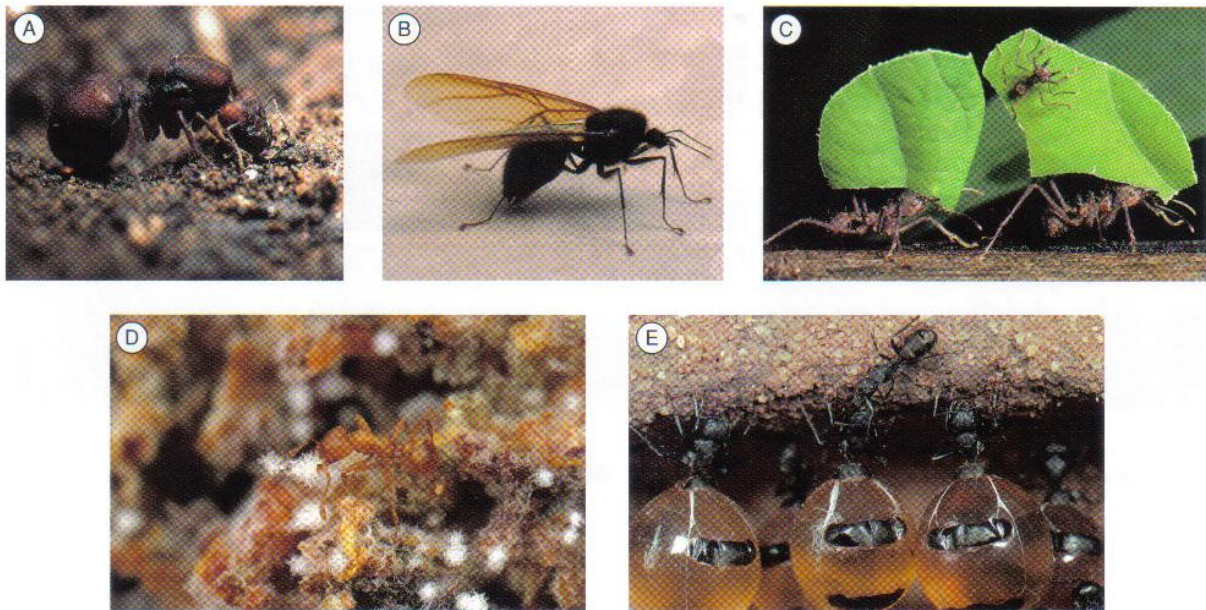
A sociedade das formigas

A ordem Hymenoptera tem cerca de 200.000 espécies descritas, das quais mais de 11.000 são formigas. Um formigueiro pode reunir desde poucas centenas até mais de 100.000 indivíduos. Recentemente descobriu-se, na Europa, um formigueiro que se estende por mais de 5.000 km, ao longo do litoral, atravessando as fronteiras da Itália e de Portugal.

Entre as muitas espécies de formigas existentes no Brasil, as saúvas (gênero *Atta*) estão entre as mais conhecidas, pelo prejuízo que causam às lavouras. Essas formigas são também conhecidas como **cortadeiras**, porque cortam e picam folhas tenras de plantas. Os pedaços de folhas são transportados até o formigueiro, onde são amontoados e semeados com fungos por formigas "jardineiras". Os fungos nutrem-se da matéria orgânica das folhas e servem de alimento aos membros da colônia. Essa curiosa atividade de cultivo de fungos será discutida mais adiante, no item relativo a mutualismo.

Na sociedade das saúvas há várias castas: as rainhas, popularmente chamadas de **içás**, são fêmeas férteis; os reis, ou **bitus**, são machos férteis; os operários são indivíduos assexuados estéreis, que podem se apresentar sob diferentes formas, cada uma especializada no desempenho de uma tarefa no formigueiro; esse fenômeno é denominado **polimorfismo** (do grego *poli*, muitos, e *morfos*, forma). Um tipo de operário é o **soldado**, armado de poderosas mandíbulas e responsável pela defesa do formigueiro. Outro tipo de indivíduo é a formiga **cortadeira-carregadeira**, cuja função é cortar e coletar folhas e pequenos gravetos. Há ainda saúvas operárias chamadas de **jardineiras**, que cuidam dos fungos que alimentam a colônia.

Na região Sudeste do Brasil, a reprodução da saúva ocorre uma vez por ano, entre outubro e dezembro. As fêmeas virgens, aladas, saem do formigueiro juntamente com os machos, também alados, e voam para se acasalar no ar. Depois de fecundada, cada fêmea funda seu próprio ninho, iniciando a postura dos ovos. Os machos perdem as asas e não retornam ao formigueiro, morrendo em seguida.

A rainha das saúvas, a içá, pode viver até 20 anos; as operárias vivem em torno de 1 ano. Em um único acasalamento, uma fêmea de saúva (rainha) armazena mais de 500 milhões de espermatozóides em seus receptáculos seminais. Os espermatozóides permanecem vivos e são utilizados para fecundar os óvulos, à medida que vão sendo produzidos. **(Fig. 16.5)**

▲ **Figura 16.5** • De A a D, diferentes castas de formigas do gênero *Atta* (saúva). **A.** Rainha (içá). **B.** Rei (bitu). **C.** Formigas-cortadeiras. **D.** Formigas-jardineiras cuidando de fungos. **E.** Formigas do gênero *Campo notus*; note o abdome dilatado de algumas formigas, especializadas em armazenar soluções nutritivas.

A sociedade dos cupins

Os **cupins**, ou **térmitas**, são insetos sociais pertencentes à ordem Isoptera, que vivem em túneis no interior do solo ou de madeira, alimentando-se basicamente de celulose. Entre as várias espécies que ocorrem no Brasil, uma das mais conhecidas é *Cryptotermes brevis*, o cupim-de-madeira-seca, típico habitante das construções humanas. Você já pode ter visto madeira devorada por esses cupins, com galerias e buracos por onde saem as formas aladas (siriris) para o acasalamento. O pozinho que sai da madeira atacada por cupins é constituído pelas minúsculas bolas de fezes dos insetos. Dificilmente cupins dessa espécie são encontrados em árvores ou em madeira fora das casas, o que mostra que eles estão muito bem adaptados para conviver conosco, caracterizando um modo de vida que os biólogos denominam antropófilo (do grego *ánthropos*, humano, e *phílos*, amigo).

Cupins como os do gênero *Reticulitermes* fazem ninhos no solo. Estes são formados por uma parte subterrânea e por uma construção de barro, em forma de monte acima do solo, que contém milhares de galerias com paredes fortalecidas por secreções salivares produzidas pelas operárias. Esses cupins alimentam-se de madeira de árvores mortas ou mesmo de árvores vivas. *Coptotermes havilandi* é uma espécie de cupim-de-solo originária do Oriente; foi introduzida no Brasil no início do século XX, pela importação de madeira contaminada. Das cidades portuárias do Rio de Janeiro e de Santos, a espécie espalhou-se pelo interior do país, onde invade a estrutura de prédios e residências, causando grandes prejuízos às construções.

As sociedades de certos cupins compõem-se de milhares de indivíduos, diferenciados em pelo menos três castas sociais. Uma delas é constituída por rainhas e reis, organismos férteis e alados, cuja função é originar todos os membros do cupinzeiro; outra casta é a dos operários, indivíduos estéreis que exercem diversas funções, como cavar túneis, coletar alimento, cuidar das ninfas (estágios jovens) etc. Há ainda a casta dos soldados, indivíduos dotados de grandes mandíbulas, especializados na defesa do cupinzeiro contra inimigos. Pode haver, também, uma casta de **reprodutores suplementares**, derivada de certas ninfas. Esses reprodutores podem tornar-se sexualmente maduros e substituir rainhas e reis que eventualmente morram.

Na época da reprodução, nos meses mais quentes e úmidos, emergem dos cupinzeiros formas aladas, os reis e as rainhas, originados do desenvolvimento de ninfas férteis. As formas aladas, conhecidas popularmente como aleluias ou siriris, são atraídas por luz e calor; depois da revoada, elas caem no solo e perdem as asas. Machos e fêmeas formam casais e constroem ninhos, onde serão os reis e as rainhas. O abdome da rainha desenvolve-se e se torna repleto de ovos, atingindo enorme tamanho. Uma rainha é capaz de pôr um ovo a cada 28 segundos, gerando até 3 milhões deles por ano, durante 25 a 50 anos. O rei permanece no ninho junto à rainha. **(Fig. 16.6**, na página seguinte**)**

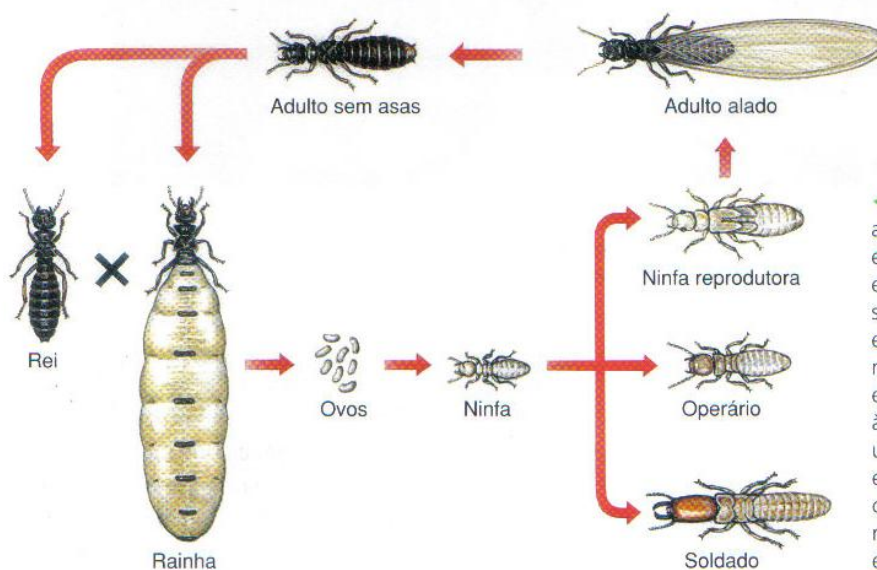
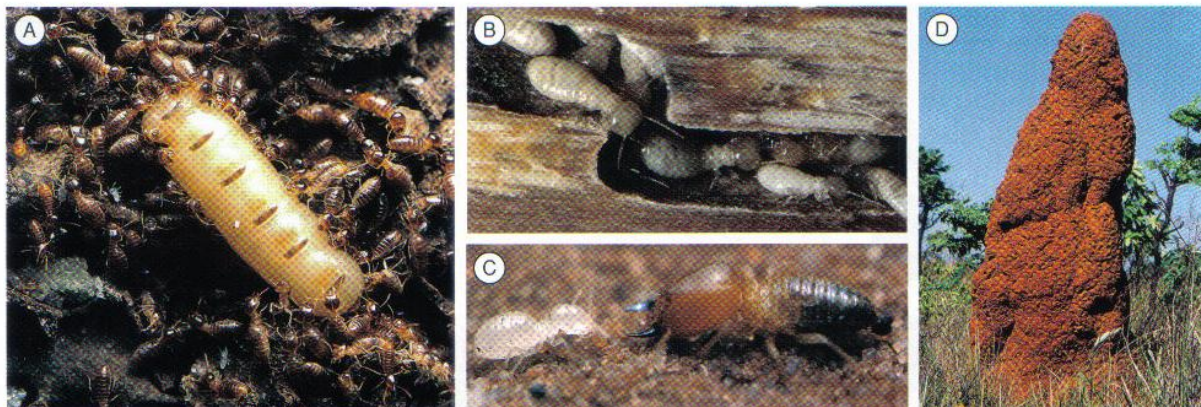



Figura 16.6 • **A.** Nos cupins, a rainha apresenta o abdome extremamente desenvolvido e repleto de ovos (note os enormes segmentos abdominais esbranquiçados com uma faixa marrom). **B.** Cupins-de-madeira seca em suas galerias. **C.** Cupins de solo; à esquerda, uma ninfa e, à direita, um soldado. **D.** Cupinzeiro de uma espécie de cupim de solo no cerrado. A ilustração mostra o ciclo reprodutivo e as castas em uma espécie de cupim.

16.3 Relações interespecíficas

As relações ecológicas entre seres de diferentes espécies de uma comunidade biológica são muito diversificadas; há desde relações em que os indivíduos de uma espécie usam os de outra como alimento, até relações em que os indivíduos de duas espécies trocam benefícios e dependem uns dos outros para sobreviver. Quando analisadas do ponto de vista de ganho ou perda para os indivíduos envolvidos, as relações ecológicas interespecíficas podem ser classificadas em positivas ou negativas. **Relações ecológicas positivas** são aquelas em que um ou ambos os indivíduos associados beneficiam-se e não há prejuízo para nenhuma das partes. **Relações ecológicas negativas** são aquelas em que há prejuízo para um dos participantes da relação ou para ambos. Em função dessas possibilidades, a Tabela 16.2 resume as relações ecológicas entre duas espécies: A e B. **(Tab. 16.2)**

TABELA 16.2 • Ganhos e perdas individuais nas relações ecológicas

Relação ecológica	Efeito sobre as espécies	
	A	B
Protocooperação	+	+
Inquilinismo (A inquilino de B)	+	0
Herbivoria (A é herbívoro, B é planta)	+	–
Predação (A é o predador)	+	–
Competição interespecífica	–	–
Comensalismo (A comensal de B)	+	0
Mutualismo	+	+
Parasitismo (A é o parasita)	+	–

O sinal (+) indica que os indivíduos da espécie são beneficiados com a associação; o sinal (–) indica que os indivíduos da espécie são prejudicados; o sinal (0) indica que não há benefício nem prejuízo para os indivíduos da espécie na associação.

Protocooperação

Protocooperação, também chamada apenas de **cooperação** ou **mutualismo facultativo**, é um tipo de relação ecológica em que as espécies associadas trocam benefícios, mas também podem viver sozinhas.

Um exemplo de protocooperação é a relação entre crustáceos do gênero *Pagurus*, conhecidos como caranguejos-eremita, e algumas espécies de anêmona-do-mar (filo Cnidaria). Esses animais não vivem necessariamente juntos, mas é freqüente encontrá-los em associação, que é vantajosa para ambos. O caranguejo-eremita abriga-se em conchas vazias de caramujos, nas quais protege seu abdome delicado, que, ao contrário de outros caranguejos, não possui carapaça rígida. Em seus deslocamentos pelo fundo do mar, ele arrasta consigo a concha que lhe serve de casa, abandonando-a apenas ao trocá-la por outra maior. Sobre as conchas ocupadas pelo eremita é freqüente encontrar uma ou várias anêmonas-do-mar, que se beneficiam da associação com o caranguejo por ganhar mobilidade e aproveitar eventuais sobras de comida. O caranguejo-eremita, por sua vez, beneficia-se dos mecanismos de defesa das anêmonas-do-mar, cujos tentáculos têm células urticantes, capazes de provocar queimaduras em eventuais inimigos.

Outro exemplo de protocooperação é a relação entre grandes mamíferos, como bois, búfalos e rinocerontes, e aves que comem seus carrapatos. Há vantagens tanto para o mamífero, que se livra dos incômodos parasitas, quanto para o pássaro, que obtém alimento com facilidade. Crocodilos também convivem cooperativamente com aves que entram em sua boca, removendo detritos e sanguessugas de suas gengivas. **(Fig. 16.7)**

Herbivoria

Herbivoria é a relação em que animais herbívoros se alimentam de partes vivas de plantas. Do ponto de vista individual, há prejuízo para as plantas e benefício para os animais que delas se alimentam. Essa relação, entretanto, é uma das mais importantes na natureza: é por meio da herbivoria que a energia captada da luz solar pelos produtores pode passar para os demais níveis tróficos das cadeias alimentares. **(Fig. 16.8)**

▲ **Figura 16.8** • A herbivoria é a relação ecológica em que a energia captada da luz solar passa dos seres autotróficos para os heterotróficos, que se alimentam de partes vivas de plantas.

◄ **Figura 16.7** • Exemplos de protocooperação.
A. Caranguejo-eremita dentro da concha que lhe serve de abrigo, sobre a qual vivem anêmonas-do-mar. A ilustração mostra um eremita colocando uma anêmona sobre a concha onde mora.
B. Mamíferos de grande porte, como os búfalos, convivem com aves que se alimentam de carrapatos, em uma relação de protocooperação.

Predação

Predação é a relação em que uma espécie animal, **predadora**, mata e come indivíduos de outra espécie animal, que constituem suas **presas**. Do ponto de vista individual, as espécies predadoras beneficiam-se, enquanto as presas são prejudicadas. Do ponto de vista ecológico, a predação é um mecanismo que regula a densidade populacional, tanto para presas como para predadores. A estreita correlação observada entre as flutuações no tamanho das populações de predadores e as das presas é da maior importância para a sobrevivência de ambas (relembre no exemplo da flutuação populacional de lebres e linces do Ártico, no capítulo 15).

Um exemplo da importância da predação na regulação das populações naturais foi observado na década de 1900, quando se proibiu a caça ao veado *Odocoileus hemionus* no Planalto de Kaibab, nos Estados Unidos, ao mesmo tempo que se estimulou a perseguição aos predadores naturais desse animal (pumas, lobos e coiotes). Como conseqüência dessas medidas, a população de veados aumentou rapidamente: em apenas 21 anos passou de 4 mil para 100 mil animais. Os campos de pastagem, porém, não eram capazes de suportar mais que 30 mil animais. Assim, quando essa capacidade de suporte do meio foi ultrapassada, os animais começaram a morrer de fome e a população de veados diminuiu bruscamente. Quinze anos depois de ter atingido o recorde de 100 mil indivíduos, a população de veados ficou reduzida a menos de 10 mil animais. O pisoteamento do solo e o fato de os veados famintos terem comido as plantas de capim até as raízes afetaram a capacidade de recuperação das pastagens; por isso, o capim não voltou a brotar como antes, mesmo depois da redução drástica da população. **(Fig. 16.9)**

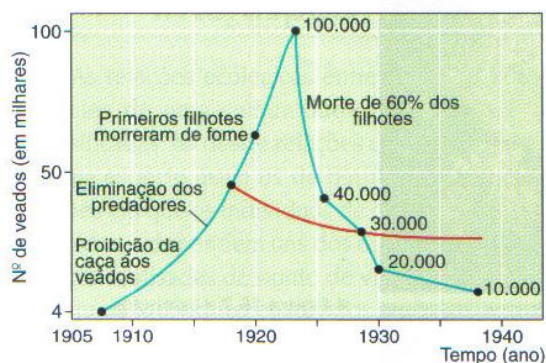
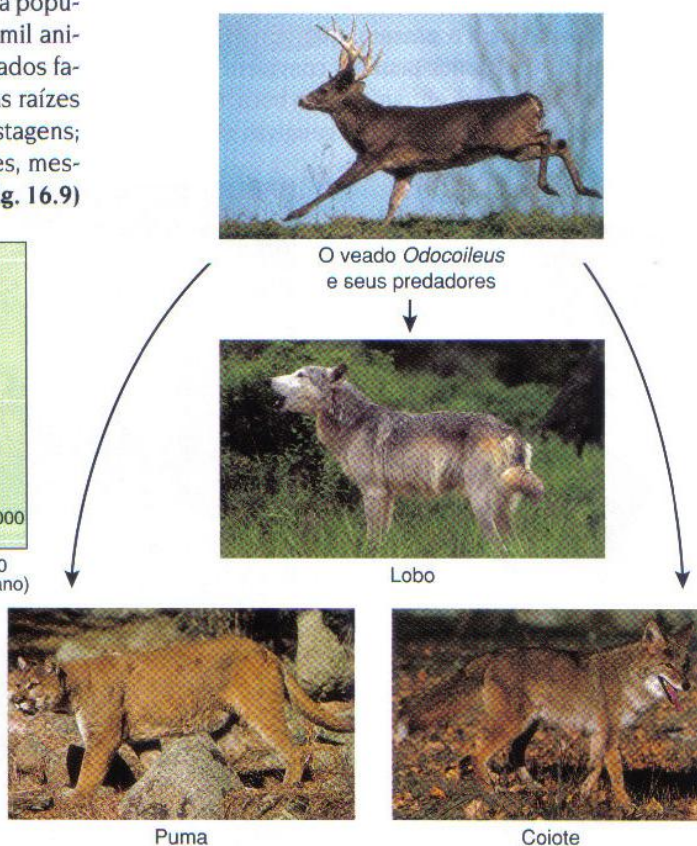



Figura 16.9 • No gráfico, a linha azul mostra o crescimento real da população do veado *Odocoileus* no Planalto de Kaibab, no Arizona (EUA), após uma campanha de combate a seus predadores naturais (ilustração à direita). Se os predadores não tivessem sido eliminados, a expectativa era de que o tamanho da população seguisse a linha vermelha do gráfico.

Competição interespecífica

Quando duas espécies de uma comunidade disputam os mesmos recursos do ambiente, pode-se dizer que seus nichos ecológicos se "sobrepõem", e ocorre **competição interespecífica** (relembre o capítulo 14). Por exemplo, espécies que comem capim, como os gafanhotos e o gado, competem por alimento, ocorrendo sobreposição da parte de seus nichos referentes à alimentação. Plantas cujas raízes estão na mesma profundidade do solo competem por água e por nutrientes minerais. Quanto mais os nichos ecológicos das espécies assemelham-se, ou seja, quanto mais sobrepostos eles forem, mais intensa é a competição entre as espécies. A competição interespecífica pode resultar tanto na extinção de uma das espécies como levá-la a migrar em busca de uma área disponível e sem espécies competidoras.

O conceito de simbiose

Em 1879, o biólogo alemão Heinrich Anton de Bary (1831-1888) criou o conceito de **simbiose** (do grego *syn*, juntos, e *bios*, vida) para designar a relação ecológica próxima e interdependente de certas espécies de uma comunidade, com conseqüências vantajosas ou desvantajosas para pelo menos uma das partes. Podem-se distinguir quatro tipos de simbiose: inquilinismo, comensalismo, mutualismo e parasitismo.

Inquilinismo

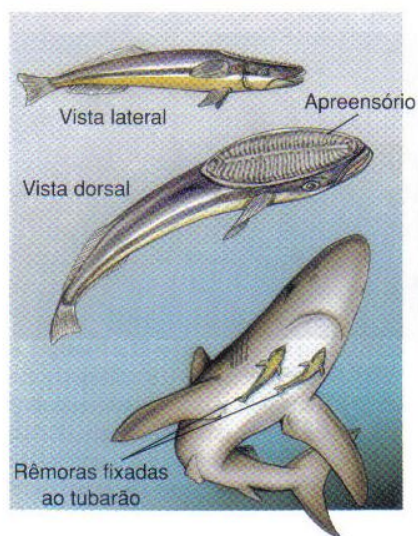
Inquilinismo é a relação em que uma espécie "inquilina" vive sobre ou no interior de uma espécie hospedeira, sem prejudicá-la. O recurso principal buscado pelo inquilino, como o próprio nome indica, é abrigo e moradia. Por exemplo, as relações entre orquídeas, bromélias, samambaias e as plantas sobre as quais crescem são exemplos de inquilinismo. Nesses casos, as espécies inquilinas são denominadas **epífitas** (do grego *epi*, sobre, e *phytos*, planta). A vantagem das epífitas em crescer sobre árvores de grande porte é obter maior suprimento de luz para a fotossíntese, principalmente no ambiente pouco iluminado do interior das florestas. **(Fig. 16.10)**

▲ **Figura 16.10** • No inquilinismo das plantas epífitas sobre árvores hospedeiras, as primeiras obtêm vantagens, mas as árvores não são prejudicadas. Lugares mais elevados, principalmente dentro de florestas fechadas, permitem obter maior luminosidade para a fotossíntese.

Comensalismo

No **comensalismo**, assim como no inquilinismo, uma das espécies é beneficiada pela simbiose, enquanto a outra, aparentemente, não obtém nenhum benefício com a relação, embora não sofra prejuízo. O principal recurso buscado pelo comensal, como o próprio nome indica, é alimento. Um exemplo clássico de comensalismo é a associação entre a rêmora (ou peixe-piloto) e o tubarão. A rêmora possui uma estrutura dorsal aderente, comparável a uma ventosa, o **apreensório**, com o qual se prende ao corpo de tubarões. O tubarão fornece transporte gratuito para a rêmora e parece não se importar com a presença desta. As rêmoras alimentam-se dos restos das presas caçadas pelos tubarões, obtendo vantagens com a associação.

A relação entre hienas e leões também é um caso de comensalismo. As hienas acompanham, a distância, bandos de leões, servindo-se dos restos da caça abandonados por eles. **(Fig. 16.11)**

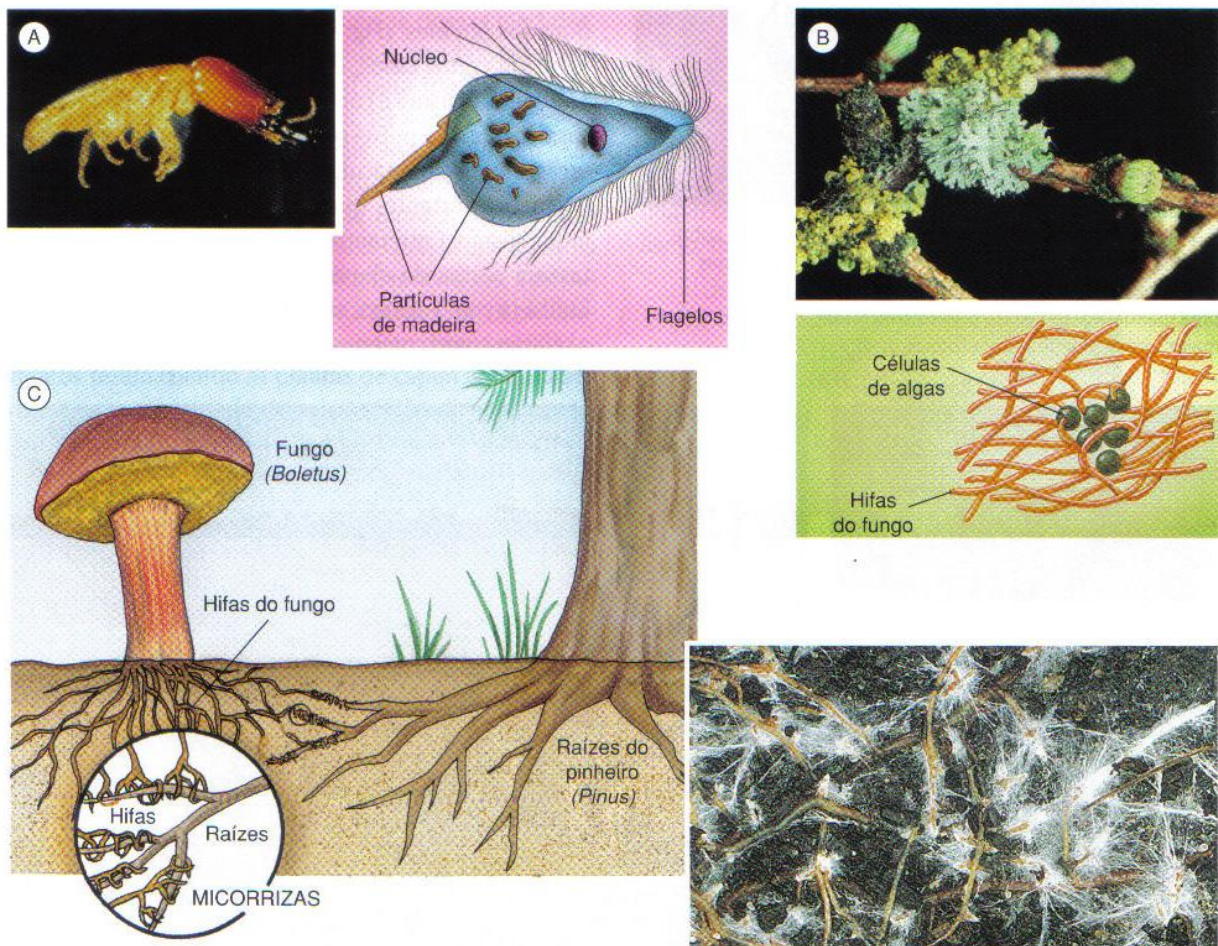
Em certos casos, é difícil estabelecer a diferença entre inquilinismo e comensalismo. Por exemplo, diversas espécies de peixe-palhaço encontram abrigo e proteção entre os tentáculos de certas anêmonas-do-mar. Dizemos, portanto, que se trata de uma relação de inquilinismo. Entretanto, se os peixes-palhaço aproveitassem restos da alimentação da anêmona, além de utilizá-la como abrigo, seria mais apropriado classificar a relação como comensalismo.

▲ **Figura 16.11** • Exemplos de comensalismo. **A.** Rêmoras "pegam carona" em um tubarão. Na ilustração, detalhe do apreensório da rêmora, que permite a fixação a tubarões, tartarugas e baleias. **B.** As hienas são comensais habituais dos leões, embora às vezes se tornem tão agressivas que quase chegam a ser competidoras.

Mutualismo

Mutualismo, às vezes chamado de **mutualismo obrigatório** (para distinguir-se do **mutualismo facultativo**, utilizado como sinônimo de protocooperação), é um tipo de simbiose em que ambas as espécies que interagem obtêm benefícios. O mutualismo difere da protocooperação pelo fato de ser permanente e indispensável à sobrevivência dos indivíduos associados; como vimos, na protocooperação os indivíduos das espécies participantes da relação podem viver associados ou não.

Um exemplo de mutualismo é a interação de certas espécies de cupim e microrganismos (bactérias e protozoários) que habitam seu intestino. Os cupins são incapazes de digerir a celulose da madeira que ingerem, o que é feito pelos microrganismos que vivem em seu tubo digestório. Estes dependem igualmente da associação, pois sobrevivem somente no corpo dos cupins.

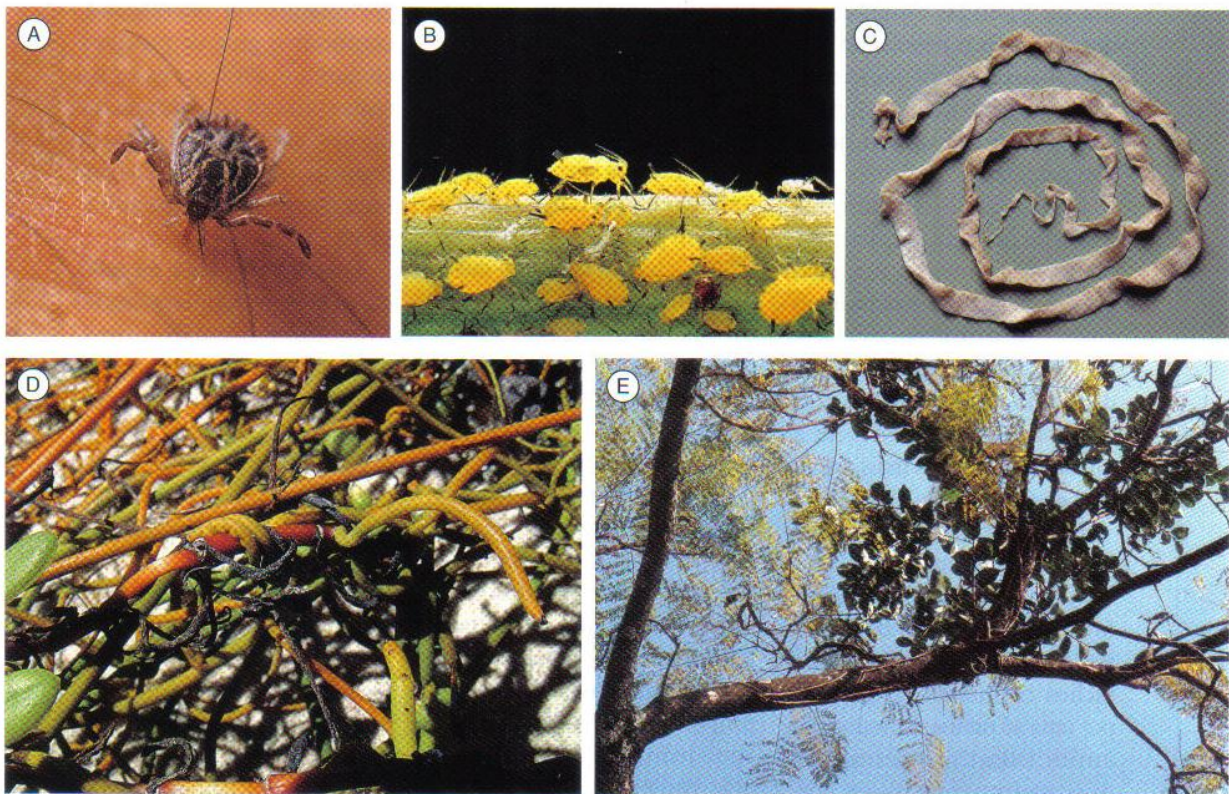
Outro exemplo de mutualismo é encontrado nos **liquens**, que são organismos formados pela associação de certas espécies de fungos e certas algas ou cianobactérias. Realizando fotossíntese, a alga (ou a cianobactéria) produz matéria orgânica, utilizada pelo fungo; este, por sua vez, facilita a absorção de água e de nutrientes, que as algas aproveitam. As algas e os fungos que constituem os liquens sobrevivem em locais onde nenhuma das duas espécies poderia sobreviver isoladamente.

Um terceiro exemplo de mutualismo é a associação entre determinados fungos e as raízes de certas plantas, formando as chamadas **micorrizas** (do grego, *mycos*, fungo, e *rhizos*, raiz). Acredita-se que os fungos facilitem a absorção de minerais do solo, o que beneficia as plantas. Por outro lado, os fungos se nutrem de substâncias obtidas das células das plantas dentro das quais se instalam (relembre a estrutura dos liquens e das micorrizas no capítulo 5 do volume 2 desta coleção). **(Fig. 16.12)**

▲ **Figura 16.12** • Exemplos de mutualismo. **A.** Certas espécies de cupim, como a da foto, abrigam em seu tubo digestório bactérias e protozoários flagelados. No desenho, protozoário do gênero *Trichonympha*, que vive no intestino do cupim-de-madeira. **B.** Liquens são associações de algas (ou cianobactérias) e fungos. Na ilustração, relação esquemática entre a alga e o fungo, no líquen. **C.** Micorrizas são associações de certos fungos com raízes de certas plantas, geralmente árvores. Estas recebem minerais que o fungo extrai do solo; o fungo, por sua vez, utiliza substâncias orgânicas elaboradas pelas plantas. Na foto, raízes envoltas por fungos formando micorrizas.

Parasitismo

Parasitismo é o tipo de simbiose em que uma espécie **parasita** associa-se a outra — a espécie **hospedeira** —, causando-lhe prejuízos por se alimentar à sua custa. Em geral, espécies parasitas e hospedeiras estão bem adaptadas umas às outras, de modo que a relação causa prejuízos não muito grandes ao organismo parasitado. Basta pensar que, se um parasita matar seu hospedeiro, ele também morrerá; portanto, a tendência é que a relação parasitária se torne equilibrada ao longo das gerações: o parasita adaptando-se ao hospedeiro e vice-versa, fenômeno denominado **co-adaptação**.

Organismos parasitas podem viver na superfície externa do hospedeiro, sendo então chamados de **ectoparasitas** (do grego *ectos*, fora), ou no interior do corpo de hospedeiro, sendo chamados de **endoparasitas** (do grego *endos*, dentro). Exemplos de ectoparasitas são piolhos e carrapatos, e de endoparasitas são as lombrigas, solitárias, bactérias, vírus e muitos outros organismos. Há animais ectoparasitas de plantas, como os pulgões, por exemplo, que sugam seiva elaborada dos caules utilizando suas trombas. Há também plantas parasitas de outras plantas. O cipó-chumbo, por exemplo, é uma planta parasita de cor amarela, sem folhas nem clorofila, com aparência de fios-de-ovos, que cresce sobre outras plantas. O cipó-chumbo tem raízes especializadas, denominadas **haustórios**, ou **raízes sugadoras**, capazes de penetrar na planta hospedeira até os vasos liberianos, de onde extrai seiva elaborada rica em substâncias orgânicas (relembre tipos de raízes no capítulo 7 do volume 2 desta coleção).

Outra planta parasita comumente encontrada sobre árvores é a erva-de-passarinho. Ao contrário do cipó-chumbo, ela tem folhas clorofiladas, sendo capaz de produzir sua própria matéria orgânica. A erva-de-passarinho introduz suas raízes especializadas no caule da planta hospedeira, retirando dela apenas seiva bruta (água e sais minerais). Por isso, os botânicos costumam dizer que a erva-de-passarinho é uma "hemiparasita" (do grego *hemi*, metade), pois extrai das plantas hospedeiras apenas substâncias inorgânicas. **(Fig.16.13)**

▲ **Figura 16.13** • Exemplos de parasitismo. **A.** Carrapatos são ectoparasitas de animais. **B.** Pulgões são ectoparasitas de plantas, das quais sugam a seiva elaborada. **C.** A solitária (gênero *Taenia*) é um verme endoparasita da espécie humana. **D.** O cipó-chumbo (gênero *Cuscuta*) é uma planta parasita de outras plantas, das quais extrai a seiva elaborada por meio dos haustórios (raízes sugadoras). **E.** A erva-de-passarinho é uma planta considerada "hemiparasita", por extrair das hospedeiras apenas substâncias inorgânicas. Ela pode ser identificada na foto por sua folhagem mais escura em relação à copa de um jacarandá-mimoso, do qual extrai a seiva bruta.

LEITURA

ESTUDO FLAGRA "NEPOTISMO" ENTRE FORMIGAS

Biólogas descobrem que operárias de uma espécie de formiga européia favorecem ovos e larvas com os quais têm parentesco

O hábito demasiado humano de dar aquele "jeitinho" para favorecer os parentes está presente até na disciplinada sociedade das formigas. Uma dupla de biólogas finlandesas desmascarou o nepotismo dos insetos ao descobrir que as operárias parecem tratar com mais cuidado ovos e larvas com quem têm parentesco.

O achado é um dos primeiros a mostrar que nem os insetos estão imunes ao nepotismo, algo previsto pela teoria evolutiva sob o nome de seleção por parentesco. E revela uma rede de intrigas dentro do formigueiro, com as operárias tentando favorecer a rainha da qual estão mais próximas geneticamente.

Na maioria dos insetos sociais, seria um tanto difícil estudar possíveis tendências para o favorecimento ilícito de parentes. Colônias[1] inteiras desses bichos costumam ser geradas por uma só rainha. Se todos são irmãos, todos têm o mesmo grau de parentesco entre si — e, portanto, não teriam motivo para querer que um parente em especial levasse vantagem.

Gene egoísta

Minttumaaria Hannonen e Liselotte Sundström, da Universidade de Helsinque na Finlândia, escolheram uma espécie que poderia oferecer algumas brechas para o nepotismo. Trata-se da *Formica fusca*, uma formiga européia cujas colônias têm, em geral, mais de uma rainha. Defendidas a todo custo pelos membros do formigueiro, elas são alimentadas pelas operárias e têm como única função pôr ovos e mais ovos durante a vida.

Não é de hoje que o nepotismo é considerado uma força poderosa por trás do comportamento dos animais. Os estudiosos da evolução costumam supor que a luta pela sobrevivência se resume a uma batalha para passar adiante os próprios genes — algo que foi apelidado de "gene egoísta" pelo zoólogo e divulgador da ciência Richard Dawkins.

Acontece que parentes próximos, como filhos e irmãos, carregam a metade dos genes de seus pais ou irmãos, enquanto a fração de genes compartilhados vai decrescendo conforme o grau de parentesco diminui. Proteger esses parentes próximos seria uma forma de garantir que os genes do próprio indivíduo tivessem uma chance a mais de sobreviver.

Foi com essa idéia na cabeça que o geneticista inglês John Haldane (1892-1964) disse, brincando, que seria capaz de morrer para salvar pelo menos dois irmãos, ou oito primos, quantidade mínima de parentes para garantir uma chance de sobrevivência a todos os seus genes.

Foi para investigar se a teoria continua valendo entre insetos sociais, provavelmente as criaturas mais cooperativas do planeta, que Hannonen e Sundström puseram mãos à obra. A dupla construiu, em laboratório, dez formigueiros artificiais, cada um

[1] O autor do artigo chama a sociedade das formigas de colônia. Embora não seja essa a definição que utilizamos neste livro, até mesmo biólogos utilizam os dois termos sem definição rigorosa.

deles "governado" por duas rainhas diferentes.

Operárias com graus diferentes de parentesco foram colocadas para cuidar do ninho, das soberanas e de suas crias, enquanto as pesquisadoras puseram-se a avaliar o grau de parentesco entre as formigas usando análises de DNA.

Estratagema flagrado

"Se as formigas operárias tiverem um parentesco mais próximo com uma das rainhas, a teoria prediz que a participação dessa rainha no formigueiro como um todo tende a aumentar", explica Hannonen. E foi exatamente isso o que a análise genética revelou.

Se a maior parte das operárias era mais aparentada a uma só rainha, a maioria das novas formigas que chegavam à fase adulta era filha dessa soberana, assim como ela tendia a predominar em número de ovos e larvas.

Como as operárias foram estudadas em grupo, Hannonen diz que é difícil precisar se todas elas agiam de forma a favorecer suas parentas. Tampouco é possível saber, por enquanto, como os insetos conseguem manipular o desenvolvimento da ninhada.

"Esse é um mecanismo não-resolvido. Ainda não sabemos se as operárias manipulam as rainhas ou a prole", diz Hannonen. "Mas vamos investigar isso no futuro próximo."

Como são responsáveis por todo o abastecimento do formigueiro, as operárias poderiam tanto reduzir os suprimentos das larvas com quem não têm laços de parentesco, ou racionar a comida da rainha, que, assim, perderia fertilidade e vigor.

E como os bichos sabem quem é parente e quem é estranho? É uma questão de química, sugere Hannonen: "Nossos estudos anteriores mostraram que a *F. fusca* tem um perfil de hidrocarbonetos [moléculas orgânicas de carbono e hidrogênio] muito variável na cutícula. Isso indica que a comunicação química pode ser muito sofisticada nessa espécie, o que ajuda a fazer esse reconhecimento". O estudo saiu na revista científica *Nature* (http://www.nature.com).

• **Fonte:** Reinaldo José Lopes, *Folha de S.Paulo*, 3 mar. 2004.

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

16.1 Tipos de relação ecológica

1. O que são relações ecológicas intra-específicas e interespecíficas? Exemplifique cada uma.

16.2 Relações intra-específicas

2. Caracterize e exemplifique competição intra-específica.
3. Caracterize colônias isomorfas e heteromorfas, exemplificando.
4. O que são sociedades? Exemplifique.
5. O que são as castas encontradas em insetos sociais?
6. O que é a partenogênese que ocorre em abelhas da espécie *Apis mellifera*?

16.3 Relações interespecíficas

7. Como podem ser classificadas as relações interespecíficas?
8. Caracterize protocooperação, exemplificando.
9. O que é herbivoria? Qual é a importância dessa relação para o mundo vivo?
10. O que é predação? Comente a importância desse tipo de relação para o equilíbrio da natureza.
11. Qual é a relação entre nicho ecológico e competição interespecífica? Exemplifique.
12. O que é simbiose? Que tipos de relação ecológica são classificadas como simbiose?
13. Caracterize inquilinismo, exemplificando.
14. Caracterize comensalismo, exemplificando.
15. Caracterize mutualismo, exemplificando.
16. Caracterize parasitismo, exemplificando.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 17 a 26.

a) Colônia.
b) Comensalismo.
c) Competição interespecífica.
d) Competição intra-específica.
e) Herbivoria.
f) Inquilinismo.
g) Mutualismo (mutualismo obrigatório).
h) Parasitismo.
i) Predação.
j) Protocooperação (mutualismo facultativo).

17. Qual é o tipo de relação ecológica entre planta e fungo na micorriza?
18. Qual é o tipo de relação ecológica entre alga e fungo no líquen?
19. Qual é o tipo de relação ecológica entre uma bromélia epífita e a palmeira sobre a qual ela cresce?
20. Qual é o tipo de relação ecológica entre boi e gafanhoto que se alimentam em um mesmo campo com pouca pastagem?
21. Qual é o tipo de relação ecológica entre o capim e a zebra que dele se alimenta?
22. Qual é o tipo de relação ecológica entre o caranguejo-eremita e a anêmona-do-mar que vive sobre sua concha?
23. Qual é o tipo de relação ecológica entre hiena e leão?
24. Que tipo de relação há entre a lombriga e um ser humano?
25. Qual é o tipo de relação ecológica entre o gavião-peregrino e o pombo que lhe serve de alimento?
26. Qual é o tipo de relação ecológica entre a rêmora e um tubarão?
27. "Uma pequena ave, conhecida como paliteiro, entra sem medo na boca do crocodilo do Rio Ganges, o gavial, removendo sanguessugas e detritos das gengivas do réptil. O crocodilo não come a ave e parece abrir a boca propositalmente para que ela atue."
De acordo com a descrição anterior, a relação ecológica entre o paliteiro e o crocodilo pode ser classificada como
a) comensalismo.
b) inquilinismo.
c) mutualismo.
d) protocooperação.
e) simbiose.
28. Suponha que a descrição da questão anterior foi modificada, substituindo-se a última frase por: "Os crocodilos abrem a boca e exibem sanguessugas e detritos, atraindo as aves e devorando-as".
Se isso realmente ocorresse, a relação entre o pássaro e o crocodilo teria de ser reclassificada como
a) comensalismo.
b) parasitismo.
c) predação.
d) protocooperação.
e) simbiose.

Utilize a descrição a seguir para responder às questões de 29 a 31.

"Certas formigas vivem em roseiras, cortando suas folhas e levando-as para os formigueiros; nos fragmentos de folhas nascem os fungos de que as formigas se alimentam. Nas roseiras também vivem pulgões, que se alimentam da seiva elaborada das plantas. As formigas cuidam dos pulgões e os protegem; levam-nos para os formigueiros e acariciam seus abdomes repletos de seiva, como se estivessem 'ordenhando' os pul-

gões para que eles liberem gotas açucaradas, muito apreciadas pelas formigas."

29. A relação ecológica que melhor descreve a associação das formigas com as roseiras é
a) comensalismo.
b) competição interespecífica.
c) herbivoria.
d) parasitismo.
e) protocooperação.

30. A relação ecológica que melhor se aplica à associação dos pulgões com as roseiras é
a) comensalismo.
b) competição interespecífica.
c) herbivoria.
d) parasitismo.
e) protocooperação.

31. A relação ecológica que as formigas estabelecem com os pulgões pode ser descrita como
a) comensalismo.
b) competição interespecífica.
c) herbivoria.
d) parasitismo.
e) protocooperação.

32. "Em locais onde há certa espécie de anêmona-do-mar, o peixe-palhaço vive entre os tentáculos desse cnidário, sendo protegido por suas células urticantes. Restos de alimento do peixe-palhaço podem ser aproveitados pela anêmona." A denominação da relação ecológica que melhor se aplica a essa associação é
a) comensalismo.
b) competição interespecífica.
c) inquilinismo.
d) protocooperação.
e) mutualismo.

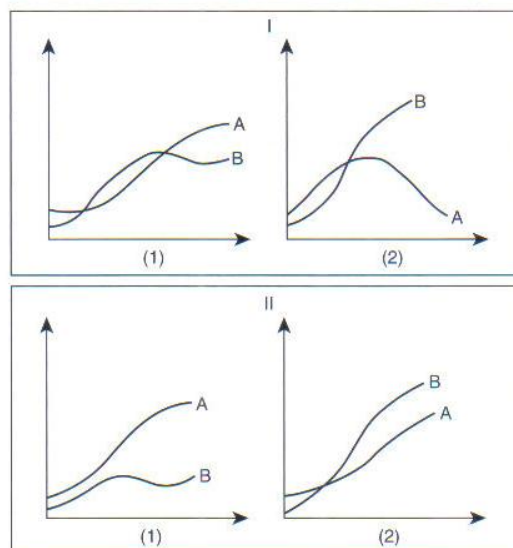
33. Suponha que a descrição da questão anterior foi modificada, substituindo-se a última frase por: "A anêmona-do-mar não tem benefício nem prejuízo com a presença do peixe-palhaço entre seus tentáculos".
Se isso realmente ocorresse, a relação entre o peixe-palhaço e a anêmona teria de ser reclassificada como
a) inquilinismo.
b) parasitismo.
c) predação.
d) protocooperação.

34. Térmitas são organismos que vivem em grandes cidadelas construídas de barro e saliva das operárias, chamadas popularmente de "cupinzeiros". Os indivíduos de um cupinzeiro repartem funções e todos cooperam para o bem-estar do grupo. Qual das relações ecológicas melhor se aplica à associação entre as térmitas?
a) Colônia.
b) Nicho ecológico.
c) Protocooperação.
d) Simbiose.
e) Sociedade.

QUESTÕES DISCURSIVAS

35. A partir das informações contidas nas tabelas 16.1 e 16.2 do capítulo, construa duas novas tabelas, uma com as relações intra-específicas e outra com as relações interespecíficas. Cada tabela deve conter tanto um resumo da relação ecológica, como na tabela 16.1, como a identificação de qual parte associada tem benefícios (+), tem prejuízos (–) ou não é afetada pela associação (0).

36. Certos insetos, entre os quais se destacam as abelhas e vespas, visitam flores, das quais recolhem pólen e néctar, que são levados para as colméias, onde servirão de alimento. Ao visitar diversas flores durante seu trabalho, os insetos transportam pólen de uma flor para outra, constituindo, assim, importantes agentes polinizadores, auxiliando a reprodução das plantas. Certas espécies de planta são altamente adaptadas a uma determinada espécie de inseto polinizador, dependendo exclusivamente dele para se reproduzir. Em outras plantas, a polinização pode ser feita por diversas espécies de inseto e até mesmo pelo vento. Como você classificaria o tipo de interação entre os insetos polinizadores e as plantas por eles polinizadas? Considere, em sua análise, tanto os casos em que o agente polinizador é altamente específico para a espécie vegetal, com alta interdependência, como os casos em que não há essa especificidade.

37. No interior de cada quadro apresentado a seguir existem dois gráficos: o da esquerda (1) representa as curvas de crescimento de duas espécies quando separadas, e o da direita (2) representa as curvas de crescimento das espécies quando reunidas. Para qualquer dos gráficos as condições do meio são ótimas para as espécies.

Classifique o tipo de relação existente entre as duas espécies em cada uma das duas situações (I e II), segundo as categorias mencionadas a seguir. Justifique sua escolha em cada caso.
a) Comensalismo.
b) Predação.
c) Competição.
d) Protocooperação.

38. Os pássaros conhecidos como pica-paus possuem uma língua alongada com um gancho na ponta. Para se alimentar, eles introduzem esse órgão nas cavidades de troncos de árvores (causadas por larvas de insetos-brocas), retirando dali larvas que lhes servem de alimento. Sabendo que as brocas são extremamente prejudiciais à saúde das plantas, classifique o tipo de relação que existe entre:
a) as brocas e as árvores onde elas vivem.
b) os pica-paus e as brocas.
c) os pica-paus e as árvores.

39. Certas espécies de formiga cultivam fungos específicos nas folhas de plantas, que cortam e levam para seus formigueiros, garantindo todas as condições para o desenvolvimento dos microrganismos; em contrapartida, as formigas alimentam-se dos fungos que cultivam. A relação entre formigas e fungos é altamente específica e interdependente: não poderiam viver um sem o outro. Analise detalhadamente as relações ecológicas que se estabelecem entre esses fungos e as formigas.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

40. (UFPE) Entre as relações ecológicas em uma comunidade biológica, há aquelas em que os indivíduos de uma espécie usam os de outra espécie como alimento até aquelas em que os indivíduos de duas espécies trocam benefícios. Analise a tabela a seguir e assinale a alternativa que mostra, de forma INCORRETA, o tipo de relação ecológica e o respectivo efeito sobre, pelo menos, uma espécie.

	Tipo de relação	Efeito sobre as espécies	
		Espécie X	Espécie Y
a)	Comensalismo (X comensal de Y)	+	0
b)	Parasitismo (X é o parasita)	+	–
c)	Predação (X é o predador)	+	–
d)	Inquilinismo (X é o inquilino de Y)	+	+
e)	Protocooperação	+	+

(+) indica que os indivíduos da espécie são beneficiados com a associação.
(–) indica prejuízo para os indivíduos da espécie.
(0) indica que não há benefício nem prejuízo para os indivíduos da espécie.

41. (Unifesp) A raflésia é uma planta asiática que não possui clorofila e apresenta a maior flor conhecida, chegando a 1,5 metro de diâmetro. O caule e a raiz, no entanto, são muito pequenos e ficam ocultos no interior de outra planta em que a raflésia se instala, absorvendo a água e os nutrientes de que necessita. Quando suas flores se abrem, exalam um forte odor de carne em decomposição, que atrai muitas moscas em busca de alimento. As moscas, ao detectarem o engano, saem da flor, mas logo pousam em outra, transportando e depositando no estigma desta os grãos de pólen trazidos da primeira flor.
O texto descreve duas interações biológicas e um processo, que podem ser identificados, respectivamente, como
a) inquilinismo, mutualismo e polinização.
b) inquilinismo, comensalismo e fecundação.
c) parasitismo, mutualismo e polinização.
d) parasitismo, comensalismo e fecundação.
e) parasitismo, comensalismo e polinização.

42. (UFSM-RS) No combate às larvas dos mosquitos "*Aedes*" (transmissores da dengue e febre amarela) foi utilizado, com eficiência, um microcrustáceo larvófago (Classe Copepoda). A utilização desse animal em experimentos controlados de campo e laboratório foi bem-sucedida no interior do estado de São Paulo. O método citado, não-tóxico, pode substituir o tradicional uso de DDT ou outros inseticidas para matar os mosquitos.
A ação do microcrustáceo em relação às larvas dos mosquitos é um exemplo de
a) amensalismo.
b) comensalismo.
c) predação.
d) mutualismo.
e) competição.

43. (Vunesp) Observe a tabela.

ESPÉCIES EM INTERAÇÃO	TIPO DE INTERAÇÃO
1. cupins × protozoários	I. Predatismo
2. boi × ovelha	II. Mutualismo
3. sapo × mosca	III. Comensalismo
4. rêmora × tubarão	IV. Competição

Indique a alternativa que associa os tipos de interação com as interações descritas.
a) 1 I, 2 II, 3 IV e 4 III.
b) 1 I, 2 III, 3 IV e 4 II.
c) 1 II, 2 IV, 3 III e 4 I.
d) 1 II, 2 IV, 3 I e 4 III.
e) 1 III, 2 II, 3 I e 4 IV.

44. (UFF-RJ) Os itens enumerados a seguir são exemplos de diferentes relações entre os seres vivos.
I. A caravela vive flutuando nas águas do mar. É formada por um conjunto de indivíduos da mesma espécie que vivem fisicamente juntos, dividindo o trabalho. Uns são responsáveis pela flutuação, outros pela captura de alimentos, outros pela defesa.
II. As orquídeas, para conseguirem luz, prendem-se com suas raízes ao tronco e aos ramos altos das árvores.
III. O leão mata e devora o gnu rajado, para se alimentar.
IV. O fungo fornece água e sais minerais retirados do meio para a alga; esta, por sua vez, fornece ao fungo as substâncias orgânicas que produz.
As relações descritas nesses itens são classificadas, respectivamente, como
a) colônia / inquilinismo / predação / mutualismo.

b) comunidade / parasitismo / canibalismo / comensalismo.
c) mutualismo / parasitismo / predatismo / simbiose.
d) população / inquilinismo / canibalismo / mutualismo.
e) comunidade / inquilinismo / canibalismo / simbiose.

45. (Vunesp) Um gavião, que tem sob suas penas carrapatos e piolhos, traz preso em suas garras um rato, com pulgas em seus pêlos. Entre o rato e as pulgas, entre os carrapatos e os piolhos e entre o gavião e o rato existem relações interespecíficas denominadas, respectivamente:
a) inquilinismo, competição e predação.
b) predação, competição e parasitismo.
c) parasitismo, competição e predação.
d) parasitismo, inquilinismo e predação.
e) parasitismo, predação e competição.

46. (UEL-PR) Para responder à(s) questão(ões) considere o texto a seguir sobre um assunto que vem sendo debatido por ecologistas há algum tempo:
Há vantagem para a planta que é pastada?
"A maioria dos especialistas acha que o herbivorismo é nocivo à planta (...). Outros sustentam que o processo é benéfico às plantas que, por um mecanismo de supercompensação, adquiriram maior aptidão darwiniana, isto é, maior capacidade de se reproduzir."
(José Reis. Ato de pastar melhora a vegetação?. *Folha de S.Paulo*. 30/05/99)

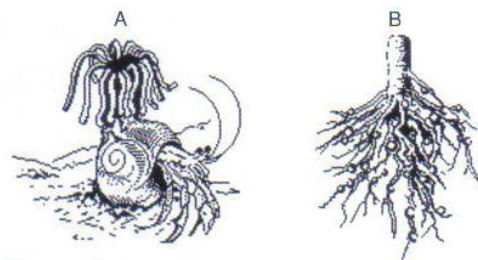
De acordo com a opinião do segundo grupo de especialistas, mencionada no texto, a relação ecológica entre a planta pastada e os pastadores pode ser considerada um caso de
a) competição.
b) parasitismo.
c) mutualismo.
d) protocooperação.
e) comensalismo.

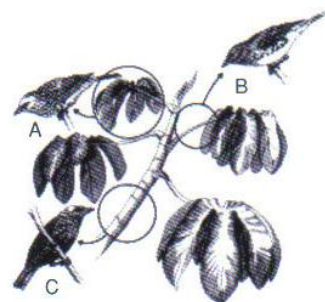
47. (Fatec-SP) Abelhas apresentam três castas sociais: as operárias, fêmeas estéreis que realizam o trabalho da colméia, a rainha e o zangão, encarregados da reprodução.
Essa divisão de trabalho caracteriza
a) sociedade isomorfa com relações intra-específicas harmônicas.
b) sociedade heteromorfa com relações intra-específicas harmônicas.
c) colônia heteromorfa com relações interespecíficas harmônicas.
d) colônia isomorfa com relações interespecíficas harmônicas.
e) colônia heteromorfa com relações intra-específicas harmônicas.

QUESTÕES DISCURSIVAS

48. (Vunesp) O cipó-chumbo é um vegetal que não possui raízes, nem folhas, nem clorofila. Apresenta estruturas especiais que penetram na planta hospedeira para retirar as substâncias que necessita para viver. Por sua forma de vida, o cipó-chumbo é considerado um holoparasita. Uma outra planta, a erva-de-passarinho, é considerada um hemiparasita e, embora retire das plantas hospedeiras água e sais minerais, possui folhas e clorofila.
Considerando essas informações, responda:
a) Pelo fato de o cipó-chumbo ser holoparasita, que tipo de nutriente ele retira da planta hospedeira para a sua sobrevivência? Justifique sua resposta.
b) Quais estruturas das plantas hospedeiras são "invadidas" pelo cipó-chumbo e pela erva-de-passarinho, respectivamente? Justifique sua resposta.

49. (Uerj) As plantas leguminosas apresentam freqüentemente nódulos nas suas raízes causados por invasão de bactérias fixadoras de nitrogênio nas células vegetais. Podemos afirmar, então, que se estabelece uma relação classificada como mutualismo entre a bactéria e a planta. Justifique essa afirmativa.

50. (UFSCar-SP) A figura A representa um bernardo-eremita (também conhecido como paguro-eremita) com uma anêmona instalada sobre a concha e a figura B, uma raiz de feijão com inúmeros nódulos, dentro dos quais estão bactérias do gênero *Rhizobium*.

Responda.
a) Qual o tipo de interação estabelecida entre os organismos em A e em B?
b) Qual a diferença fundamental entre elas?

51. (Uerj) Os três pássaros abaixo, identificados pelas letras A, B e C, coexistem na mesma floresta. Cada um deles se alimenta de insetos que vivem em locais diferentes da mesma árvore, indicados pelos círculos:

(COX, C. Barry e MOORE, Peter D. *Biogeography*. London: Blackwell Science, *1993.*)

a) Indique o tipo de relação ecológica existente entre esses pássaros e os insetos.
b) Explique o fato de não existir competição direta entre os pássaros.

CAPÍTULO

17 SUCESSÃO ECOLÓGICA E BIOMAS

▶ Vegetação pioneira crescendo sobre lava solidificada (Parque Nacional dos Vulcões, Havaí, EUA).

17.1 Sucessão ecológica

Espécies pioneiras

Há regiões da Terra em que o clima e as condições do solo não favorecem o estabelecimento de populações de seres vivos; por exemplo, superfícies de lavas vulcânicas recém-solidificadas, superfícies de rochas, dunas de areia etc. Mesmo assim, certas espécies de organismos — as **espécies pioneiras** — conseguem se instalar nesses lugares inóspitos, suportando severas condições e abrindo caminho para a chegada de outras espécies.

Dunas de areia, por exemplo, podem ser colonizadas por certas espécies de gramíneas, cujas sementes chegam trazidas pelo vento. Essas plantas conseguem suportar o calor, a escassez de água e o solo pouco estável, iniciando a colonização do local. Os liquens também são organismos pioneiros importantes na colonização de locais inicialmente desfavoráveis à existência de seres vivos, como a superfície de rochas, por exemplo. **(Fig. 17.1)**

A colonização pelas espécies pioneiras vai gradualmente modificando as características originais do lugar, reduzindo as bruscas variações de temperatura do solo exposto, o que contribui para a manutenção de certo grau de umidade. O material orgânico proveniente da decomposição dos organismos pioneiros que morrem acumula-se no solo, aumentando a quantidade de nutrientes disponíveis e a retenção de água. No caso de dunas, as raízes das plantas pioneiras ajudam na estabilização do solo, evitando que o vento carregue as partículas de areia com facilidade. Sob essas novas condições, outras plantas e animais podem chegar e se estabelecer. As espécies que chegam competem com as pioneiras e vão gradualmente substituindo-as.

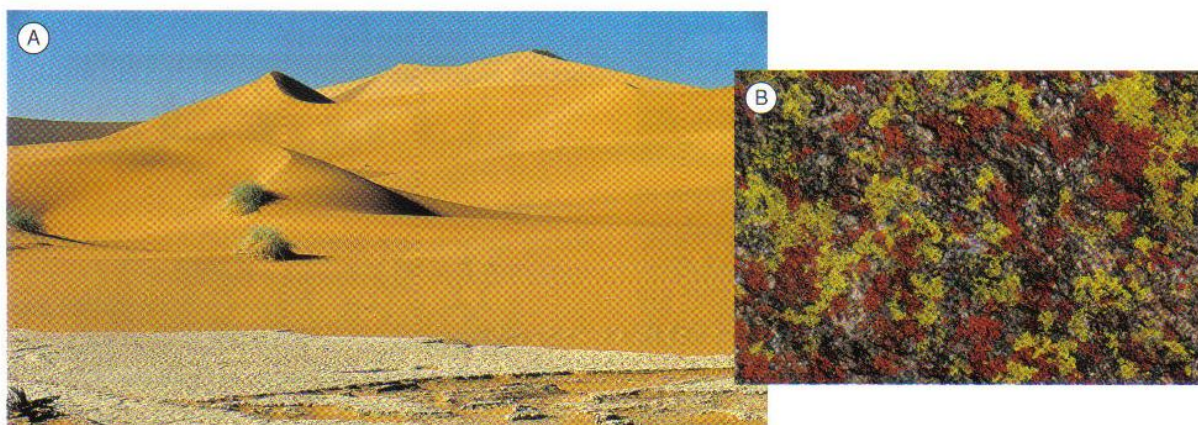



Figura 17.1 • **A.** Dunas de areia, cujo solo é movediço e incapaz de reter água e nutrientes, podem ser colonizadas por gramíneas; estas, pouco a pouco, criam condições para a chegada de outros seres vivos. **B.** Certas espécies de líquen conseguem viver sobre rochas nuas, liberando substâncias que as decompõem parcialmente. Forma-se assim uma fina camada de solo, que favorece a instalação de outros seres vivos.

As sucessivas gerações de plantas e animais que nascem, crescem, morrem e se decompõem vão tornando o solo cada vez mais rico em matéria orgânica e umidade. O local, antes desabitado, passa então a abrigar uma comunidade biológica, cuja complexidade depende do tempo que se passou desde o início da colonização, das condições climáticas locais e das espécies colonizadoras. Esse processo gradativo de colonização de um hábitat, em que a composição das comunidades vai se alterando ao longo do tempo, é denominado **sucessão ecológica**.

Sucessão primária e sucessão secundária

No exemplo das dunas, a sucessão tem início em uma área antes desabitada, cujas condições iniciais são altamente desfavoráveis à vida; nesse caso, fala-se em **sucessão primária**. **(Fig. 17.2)**

Em rochas nuas e em lavas solidificadas de vulcões, também ocorre sucessão primária; ali os principais organismos pioneiros são alguns tipos de liquens, que

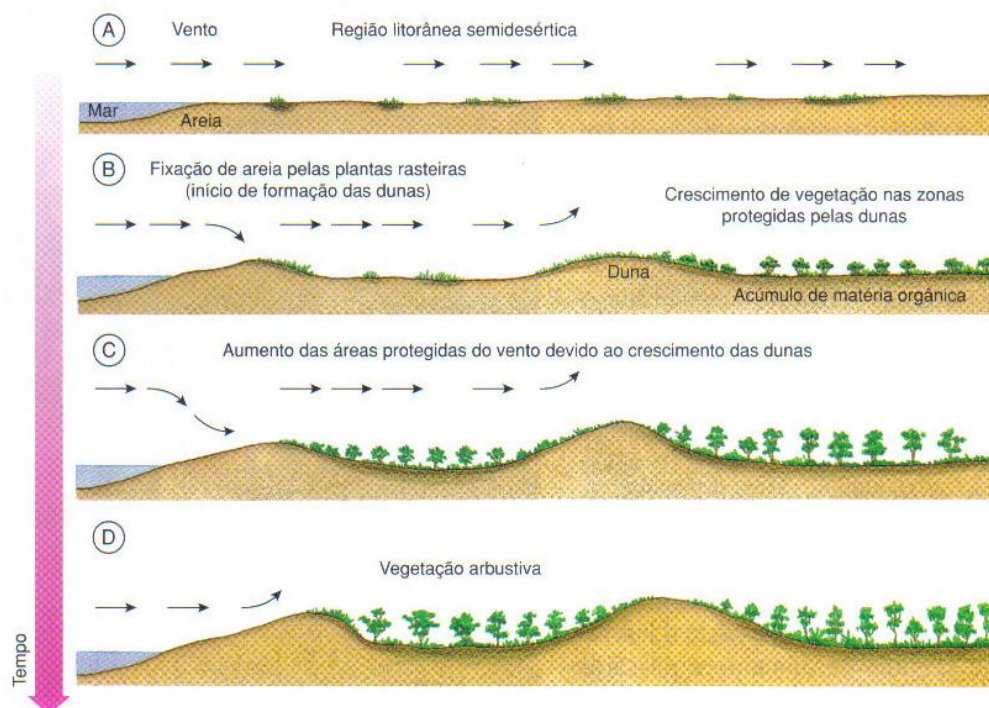



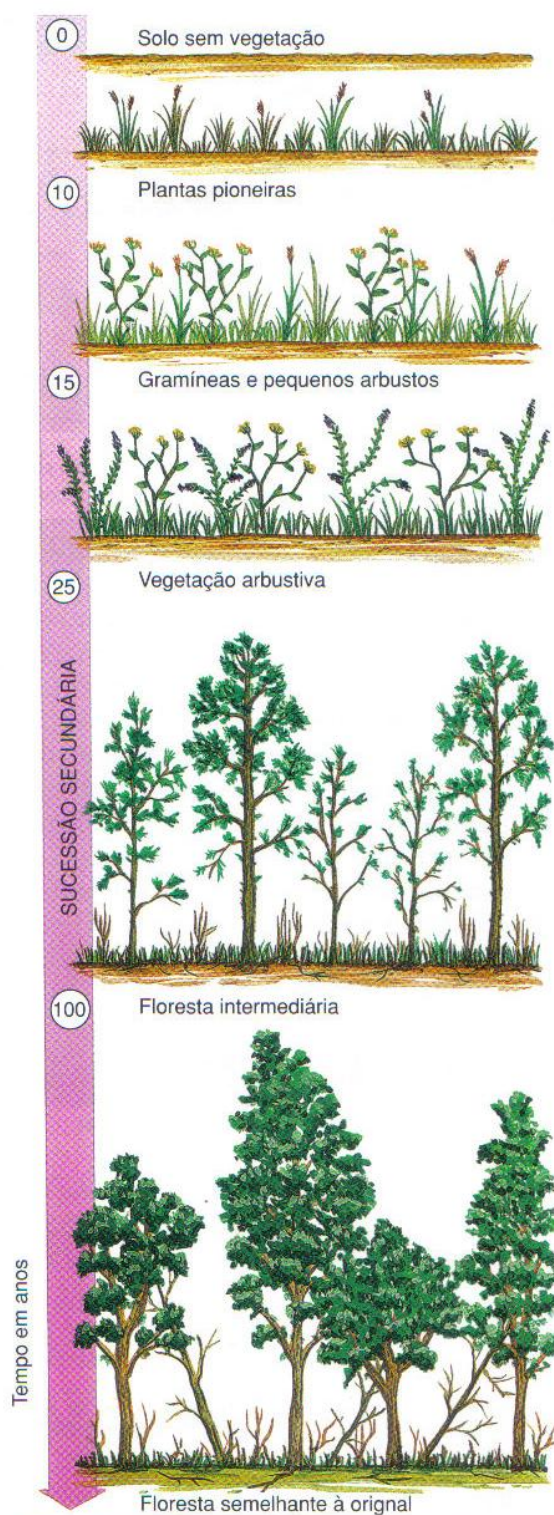
Figura 17.2 • Sucessão ecológica em dunas de areia. A vegetação pioneira contribui para a fixação das dunas, o que modifica o sistema de ventos e contribui para alterar o clima local. Este torna-se cada vez mais propício ao estabelecimento de seres vivos.

podem crescer, absorvendo a pouca umidade disponível. A decomposição superficial da rocha provocada pelo crescimento dos liquens, assim como a morte e decomposição destes, vai originando uma fina camada de solo sobre a rocha, que permite o crescimento de outros organismos, como musgos e gramíneas. Dessa forma, as comunidades vão se sucedendo e modificando cada vez mais o lugar. O processo de sucessão primária é geralmente lento, podendo levar dezenas de anos para que um solo rochoso passe a abrigar uma vegetação rala de arbustos e de gramíneas.

Outro tipo de sucessão, denominado **sucessão secundária**, ocorre em locais desabitados que, porém, já foram anteriormente ocupados por uma comunidade biológica e por isso apresentam condições mais favoráveis ao estabelecimento de seres vivos. É o caso de campos de cultivo abandonados, de florestas derrubadas, de áreas destruídas por queimadas ou de lagos recém-formados. Em um campo de cultivo abandonado, por exemplo, o solo já está formado e contém nutrientes disponíveis. As mudanças nas sucessões secundárias são mais rápidas que as que ocorrem em uma sucessão primária. **(Fig. 17.3)**

Evolução das comunidades durante a sucessão

Em linhas gerais, é possível prever o tipo de sucessão que ocorrerá em determinado local, pois a comunidade biológica ali presente tende a evoluir até atingir um ponto, denominado clímax, condicionado pelas características físicas e climáticas do local. Por exemplo, a sucessão em um campo de cultivo abandonado, onde anteriormente existia uma floresta, tenderá a atingir esse mesmo tipo de comunidade final, passando por uma sucessão de comunidades intermediárias: campos → arbustos → floresta intermediária → floresta semelhante à original.

A cada estágio do processo de sucessão, os organismos da comunidade provocam modificações na estrutura física do hábitat e no clima, inaugurando nichos ecológicos novos, que favorecem a chegada de novas espécies. Com isso, as espécies mais antigas vão sendo gradualmente substituídas pelas novas que se estabelecem no local. Por exemplo, plantas suculentas criam o nicho ideal para pulgões e para outros insetos herbívoros. Estes, por sua vez, servem de alimento a insetos predadores, que servirão de alimento a pássaros insetívoros e assim por diante. Durante a sucessão, o ecossistema vai se tornando progressivamente mais complexo, com maior quantidade de nichos ecológicos e, conseqüentemente, de espécies.

▲ **Figura 17.3** • Sucessão secundária em um campo de cultivo abandonado. Nos primeiros 10 anos de abandono, a vegetação típica foi de campo aberto, com predomínio de gramíneas. Entre os 10 anos e 25 anos seguintes, surgiu uma vegetação em que predominavam arbustos.Entre os 25 anos e 100 anos, surgiu uma floresta dominada por pinheiros (floresta intermediária). Após 100 anos de sucessão, estabeleceu-se uma floresta típica da região, idêntica à que havia antes da derrubada que estabeleceu os campos de cultivo.

O conceito de microclima

Os biólogos utilizam o termo **microclima** para referir-se às condições ambientais particulares do hábitat ao qual estão adaptadas determinadas espécies. Por exemplo, no interior de uma floresta, o microclima, caracterizado pelas condições de umidade e de temperatura, é especialmente favorável à vida de uma grande variedade de organismos. Durante o processo de sucessão, estabelecem-se microclimas que permitem a chegada e o estabelecimento de novas espécies.

O aparecimento de novos nichos ecológicos durante a sucessão ecológica leva ao aumento da diversidade de espécies na comunidade, ou seja, ao aumento da **biodiversidade**. Com isso, aumenta o número total de indivíduos capazes de viver no local e, portanto, a **biomassa** do ecossistema em sucessão. O crescimento da teia de relações entre seus componentes permite à comunidade ajustar-se cada vez mais às variações impostas pelo meio, aumentando sua **homeostase** (do grego *homoios*, de mesma natureza, igual, e *stasis*, estabilidade), isto é, sua capacidade de manter-se estável apesar das variações ambientais.

O máximo de homeostase é atingido quando a sucessão atinge o clímax, um estado de estabilidade compatível com as condições da região. Essa comunidade estável, denominada **comunidade clímax**, constitui o final da sucessão ecológica. Na comunidade clímax, a biodiversidade, a biomassa e as condições microclimáticas tendem a se manter constantes. **(Fig. 17.4)**

▲ **Figura 17.4** • Uma floresta é um ecossistema cuja comunidade clímax se mantém estável ao longo do tempo. Nela há muitos nichos, ocupados por diversas espécies animais e vegetais, e uma rede intrincada de relações ecológicas.

17.2 Fatores que afetam a evolução dos ecossistemas

O desenvolvimento que uma comunidade pode atingir, isto é, seu clímax, depende de um conjunto de características do meio. As mais importantes são o **clima** — que inclui a temperatura ambiental, o índice de chuvas etc. — e o tipo de **solo** presentes na região.

A insolação do planeta

Um dos fatores que determinam as condições de vida nas diferentes regiões da Terra é a **insolação**, isto é, a quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre. A insolação depende de dois fatores principais: a latitude e a inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao ângulo de incidência dos raios solares.

O efeito da latitude

Na linha do equador, isto é, na latitude zero, os feixes de radiação solar incidem quase perpendicularmente à superfície terrestre, enquanto nas regiões situadas em latitudes crescentes, para o norte e para o sul, os feixes incidem obliquamente, devido à curvatura da Terra. Conseqüentemente, no equador, a mesma quantidade de energia solar se distribui em uma área menor de superfície terrestre que junto dos pólos; por isso, no equador, a mesma quantidade de energia solar aquece mais determinada área da superfície que nos pólos.

A inclinação do eixo terrestre e as estações do ano

O eixo de rotação da Terra apresenta uma inclinação de 23,5° (graus de circunferência) em relação ao Sol. A inclinação do eixo não se altera ao longo do ano, de tal maneira que, no início do ano, o hemisfério norte está inclinado para longe do Sol. Isso, além de fazer os feixes de radiação incidirem obliquamente à superfície daquele hemisfério norte, diminui a duração dos dias, resultando em temperaturas baixas. No hemisfério sul ocorre o contrário. **(Fig. 17.5**, na página seguinte**)**

A circulação de calor na atmosfera

A atmosfera desempenha um papel fundamental na manutenção do clima da Terra. Ela funciona como uma manta gasosa que retém o calor irradiado pela superfície, mantendo a temperatura relativamente elevada.

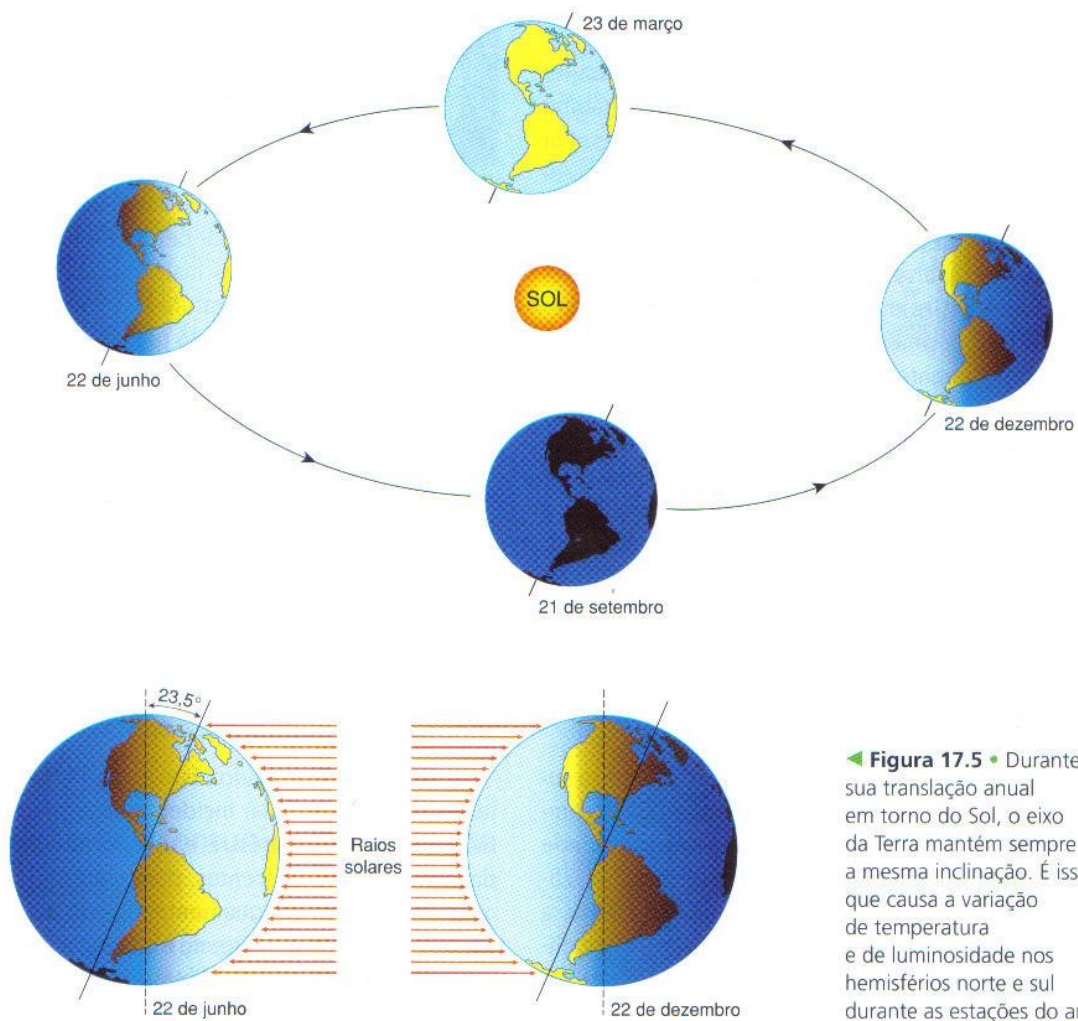



Figura 17.5 • Durante sua translação anual em torno do Sol, o eixo da Terra mantém sempre a mesma inclinação. É isso que causa a variação de temperatura e de luminosidade nos hemisférios norte e sul durante as estações do ano.

Esse fenômeno, denominado **efeito estufa**, é fundamental para a vida na Terra. Muitos cientistas acreditam que o efeito estufa está se intensificando devido à poluição atmosférica, ocasionando um aquecimento do planeta maior do que o normal (esse assunto será discutido no capítulo 18).

Dois fatores, atuando em conjunto, determinam o fluxo e a circulação de massas atmosféricas: o maior aquecimento da superfície no equador e o efeito de rotação da Terra.

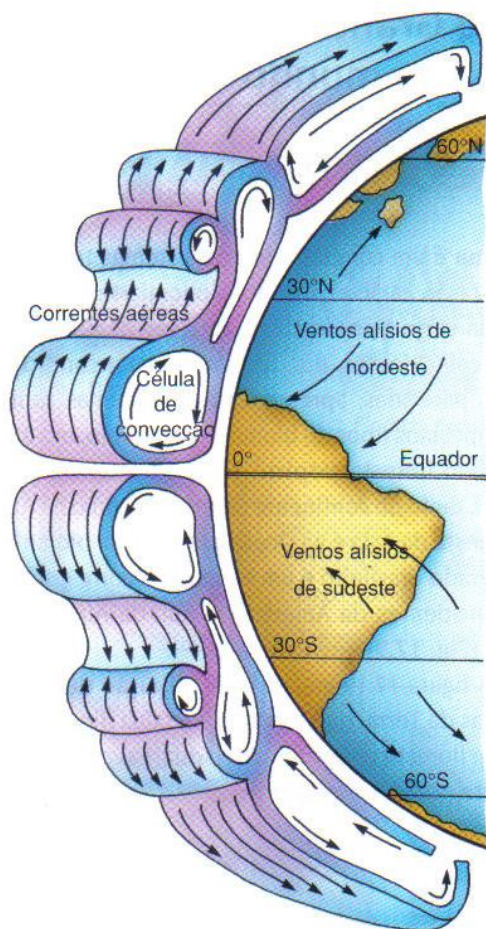
Convecção

Nas regiões equatoriais, o ar, fortemente aquecido pelo calor que irradia do solo, sobe e gera uma zona de baixa pressão que é imediatamente ocupada por ar mais frio. Esse fenomêno, em que o ar se movimenta devido ao aquecimento desigual, é conhecido como corrente de **convecção**.

O ar aquecido desloca-se afastando-se do equador e, aproximadamente nas latitudes de 30° norte e sul, a massa de ar desce. Junto à superfície, o ar atmosférico novamente se aquece, subindo e deslocando-se até 60° de latitude, onde desce novamente. Uma terceira e última corrente de convecção leva massas atmosféricas até as regiões polares. **(Fig 17.6)**

As correntes oceânicas

A água dos mares e dos oceanos circula continuamente, formando correntes resultantes do efeito combinado dos ventos e da rotação da Terra. No hemisfério norte, as correntes oceânicas circulam no sentido horário, ao passo que no hemisfério sul circulam no sentido anti-horário.

Duas correntes oceânicas muito importantes são a Corrente do Golfo e a Corrente de Humboldt. A primeira leva água aquecida do equador até a costa da América do Norte e da Europa, tornando mais amenas as temperaturas dessas regiões. A segunda leva águas resfriadas da região polar até a costa pacífica da América do Sul.

▲ **Figura 17.6** • Há grandes áreas de circulação atmosférica produzidas pelo aquecimento e elevação do ar, denominadas células de convecção. Elas são responsáveis pelo regime de chuvas e pela circulação de calor e umidade no planeta.

Além de contribuir para a circulação de calor, as correntes oceânicas são importantes para a circulação de nutrientes no ambiente marinho. **(Fig. 17.7)**

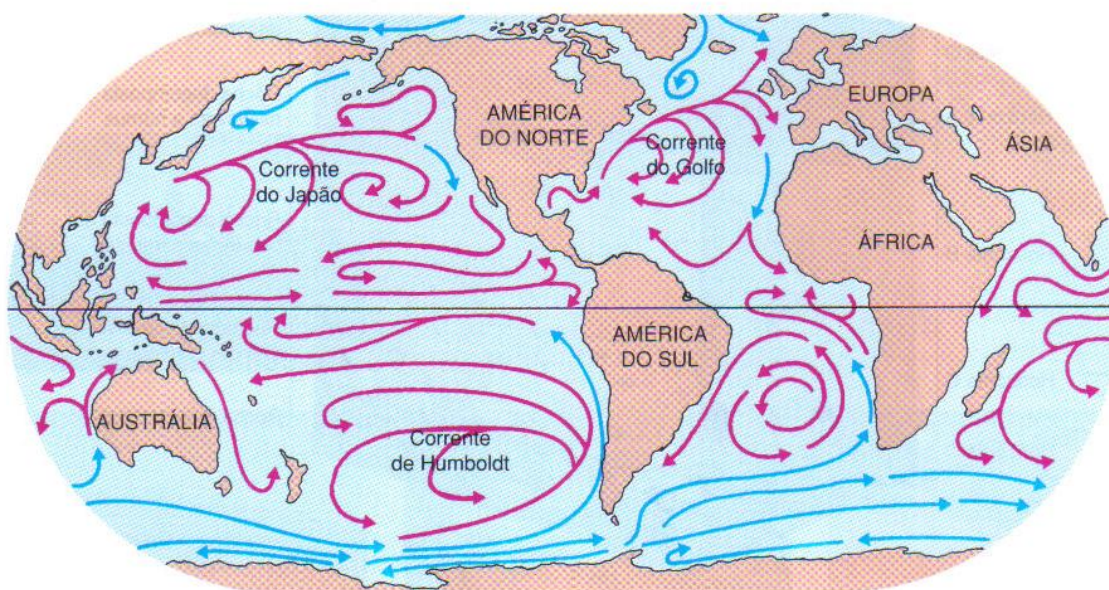
O solo

Intemperismo

O **solo** forma-se pela desagregação das rochas da superfície terrestre. O aquecimento pelo Sol e o resfriamento brusco pelas chuvas, somados à ação dos ventos, são os fatores que constituem o **intemperismo**, o fenômeno responsável pela fragmentação das rochas, que são reduzidas a pequenas partículas, e pela alteração de suas propriedades físicas e químicas.

As partículas que compõem as camadas superiores do solo, mais sujeitas aos efeitos do intemperismo, têm diâmetro menor que o das que compõem as camadas mais profundas. A rocha não-decomposta, localizada na posição mais inferior do solo, é denominada **rocha matriz**.

Quanto à textura, os solos podem ser formados por partículas maiores ou menores, desde areia grossa, formada por partículas com 0,2 mm a 2 mm de diâmetro, até areia fina e argila, esta última com menos de 2 µm de diâmetro.

Se as partículas do solo são grandes, a água das chuvas infiltra-se rapidamente e pouca umidade fica retida. Por outro lado, solos constituídos por muita argila retêm água e minerais como os de Ca^{2+}, K^{+} e Mg^{2+}. O solo mais adequado para as plantas compõe-se de uma mistura de partículas grandes e pequenas, que retem água sem, no entanto, encharcar-se demais.

▲ **Figura 17.7** • No hemisfério norte a circulação das correntes oceânicas dá-se no sentido horário, enquanto no hemisfério sul ela se dá no sentido anti-horário. Regiões pesqueiras como a costa de Portugal e a do Peru devem a abundância de pescado à circulação de nutrientes promovida por correntes marinhas frias.

A vegetação também participa da formação do solo. Quando a vegetação é densa, a camada mais superficial pode ser formada quase totalmente por matéria orgânica decomposta, o **húmus**, um material rico em nutrientes que se infiltram no solo e são absorvidos pelas raízes das plantas. Minhocas e diversos tipos de microrganismos têm papel fundamental na formação do húmus.

Lençol freático

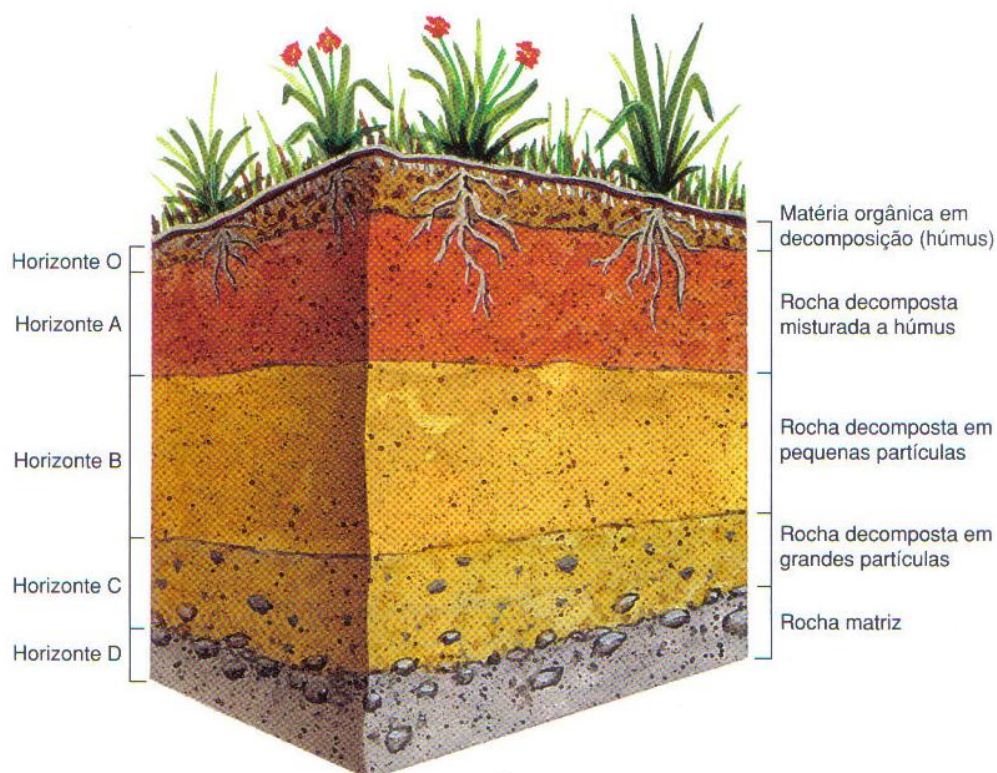
Em locais onde as chuvas são abundantes, a água infiltra-se no solo e acumula-se junto à rocha matriz, formando uma zona permanentemente saturada de água, o **lençol freático**. A água do lençol freático pode deslocar-se sobre a rocha matriz e aflorar à superfície, formando um "olho-d'água", que pode originar um riacho e, eventualmente, um rio.

Acima do lençol freático, o solo fica saturado de água apenas após as grandes chuvas. Entre essa região e a superfície, além de água, existe ar entre as partículas. Certas árvores possuem raízes tão profundas que chegam a atingir o lençol freático. Isso as torna capazes de resistir à eventual falta de água nas camadas superficiais do solo, o que prejudica plantas menores. **(Fig. 17.8)**

17.3 Grandes biomas do mundo

O que é bioma?

Bioma é um conjunto de ecossistemas terrestres com vegetação característica e fisionomia típica, onde predomina certo tipo de clima. Regiões da Terra com latitudes coincidentes, em que prevalecem condições climáticas parecidas, apresentam ecossistemas semelhantes e mesmos tipos de bioma. Por exemplo, o bioma denominado floresta tropical pluvial ocorre na faixa equatorial, tanto no continente americano como na África, no sudeste da Ásia e na Oceania. A savana, bioma do qual o cerrado brasileiro é um exemplo, ocorre em latitudes coincidentes da América do Sul, da África e da Austrália. **(Fig. 17.9)**

A figura 17.10 mostra a distribuição dos grandes biomas da Terra, que são: tundra; taiga (floresta de coníferas); floresta temperada decídua; savana; pradaria; floresta tropical; deserto. **(Fig. 17.10)**

▲ **Figura 17.8** • Corte de solo mostrando suas diversas camadas (horizontes). Nas camadas superficiais existe ar entre as partículas de solo. Junto à rocha matriz o solo está permanentemente encharcado de água, formando o lençol freático, entre os horizontes C e D.

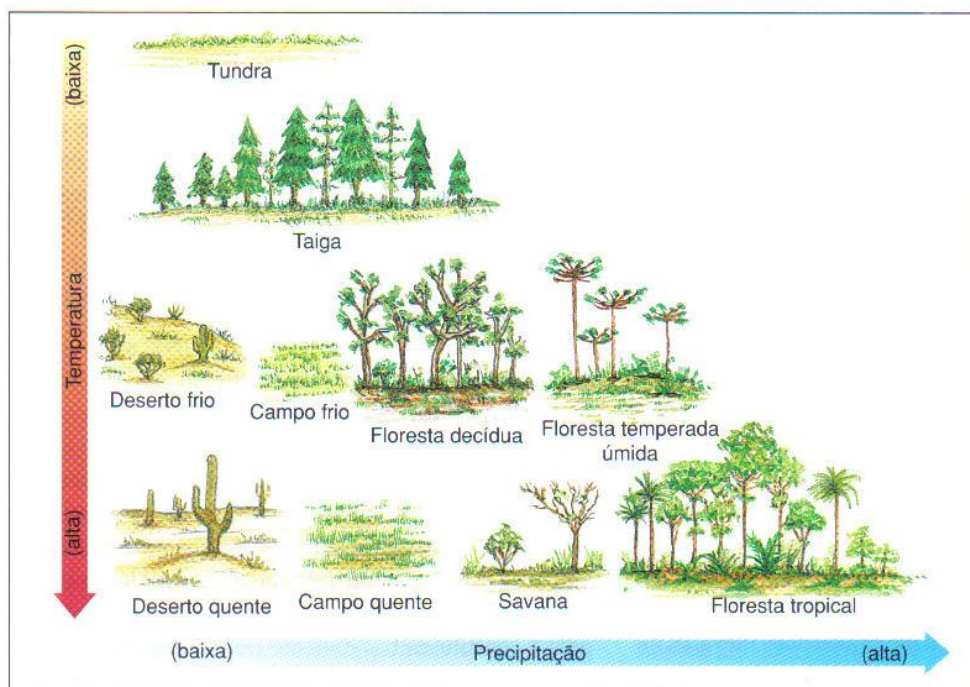



Figura 17.9 • Fatores como a temperatura média na região e o regime de chuvas, relacionados com a latitude, determinam o tipo de bioma que se desenvolve.

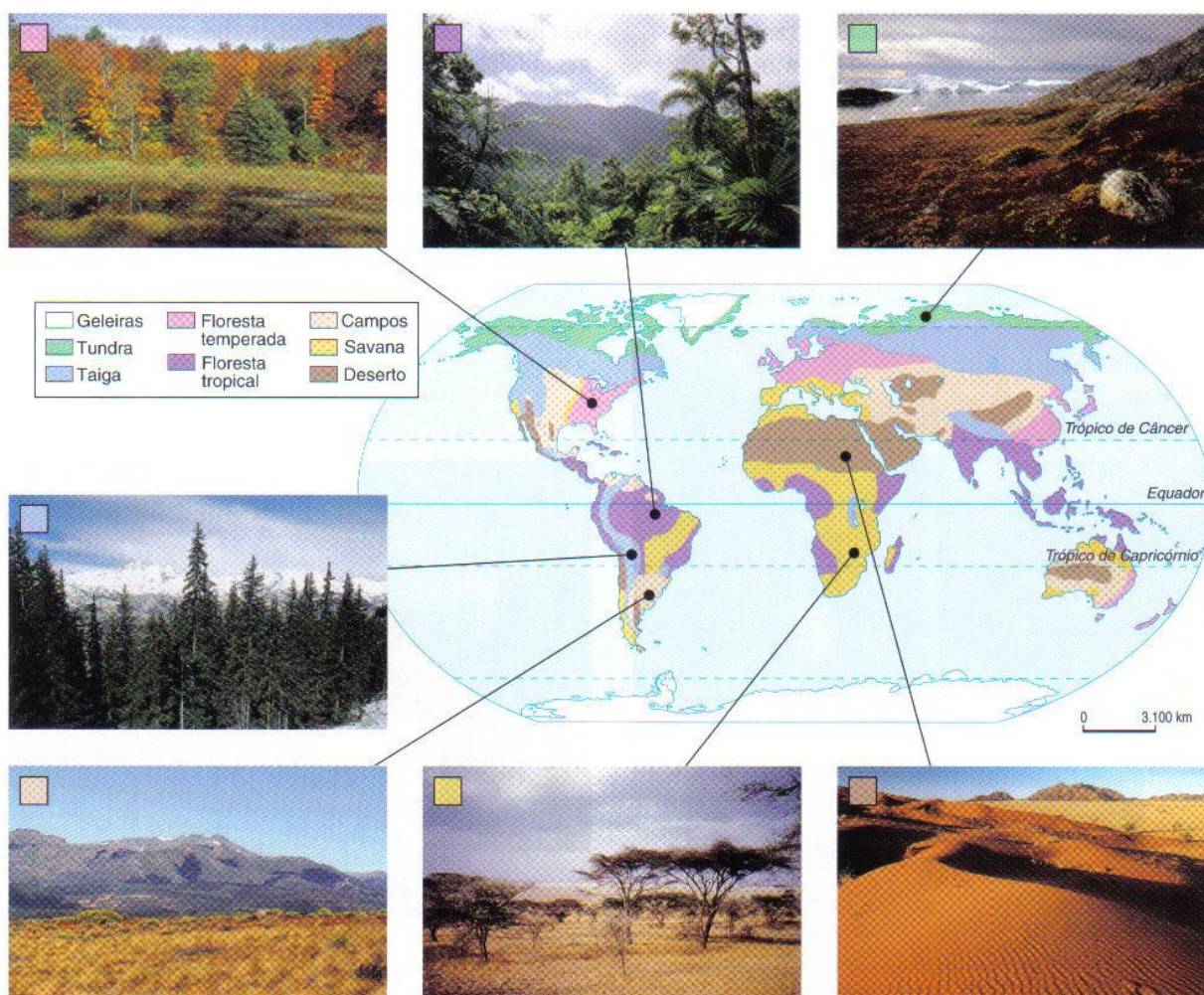
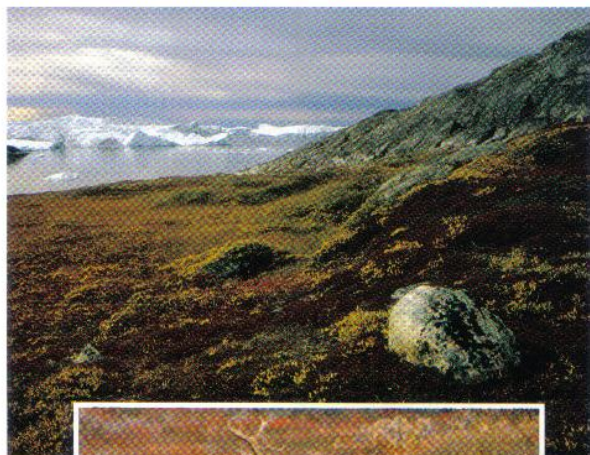
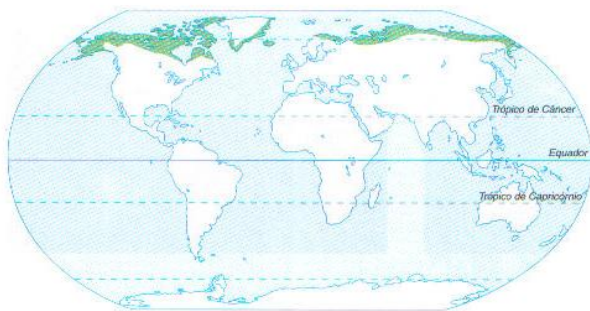



Figura 17.10 • Distribuição mundial dos principais biomas.

Tundra

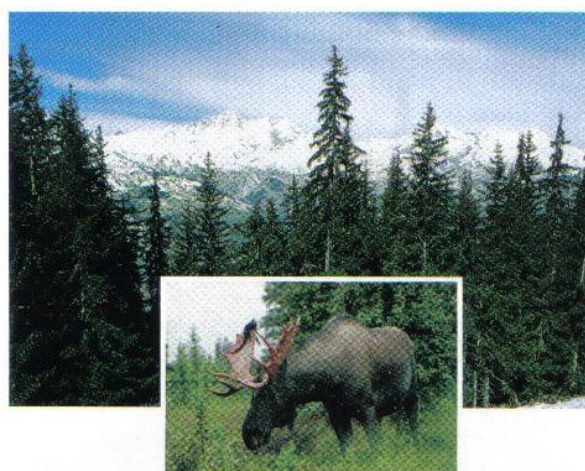
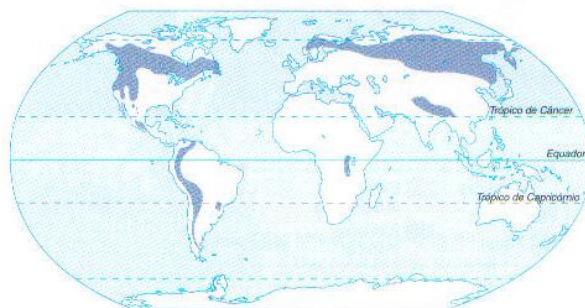
O bioma denominado **tundra** situa-se nas regiões próximas ao pólo Ártico, no norte do Canadá, da Europa e da Ásia. Nesses locais, a neve cobre o solo durante quase todo o ano, exceto nos três meses de verão, quando a temperatura chega, no máximo, a 10 °C. No verão, apenas uma fina camada superficial do solo descongela-se; poucos centímetros abaixo da superfície, o solo permanece congelado, impedindo a drenagem da água do degelo, o que leva à formação de vastos pântanos.

Embora não falte água na tundra, as plantas não conseguem absorvê-la do solo porque a temperatura é muito baixa. Assim, mesmo estando em solo encharcado, os vegetais sofrem de falta d'água, o que os biológicos denominam **seca fisiológica**.

Na tundra situada mais ao norte, a vegetação é constituída basicamente por musgos e liquens; mais ao sul, onde a temperatura média é um pouco mais elevada, há também gramíneas e pequenos arbustos. **(Fig.17.11)**

▲ **Figura 17.11** • A tundra é um bioma típico da região circumpolar ártica. O caribu é um mamífero típico desse bioma.

Com relação à fauna, os mamíferos mais típicos da tundra são a rena, o caribu e o boi almiscarado. Esses animais são protegidos por uma pelagem densa e podem sobreviver comendo apenas liquens, que procuram revolvendo a neve com os cascos. As aves da tundra, em sua maioria aves aquáticas pernaltas, migram para regiões mais quentes durante os meses de inverno. Há também algumas espécies de inseto, que hibernam no inverno como forma de resistir às baixas temperaturas e entram em atividade logo que se inicia o degelo.

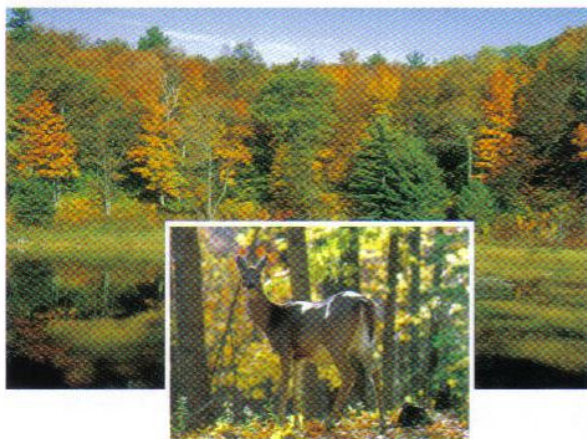
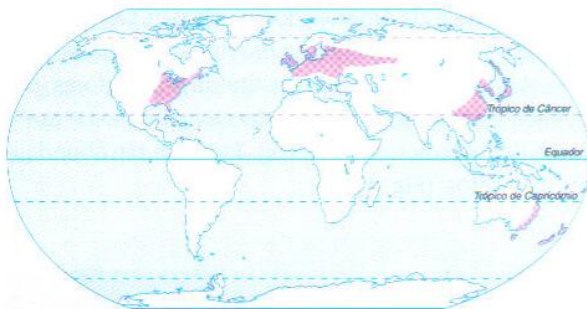
Taiga (floresta de coníferas)

O bioma denominado **taiga** situa-se principalmente no hemisfério norte, ao sul da tundra ártica, onde o clima é frio, com invernos quase tão rigorosos quanto os da tundra, embora a estação quente seja um pouco mais longa e amena. A taiga é conhecida também como **floresta de coníferas**, pois é constituída basicamente por árvores desse grupo de gimnospermas, como os pinheiros e abetos, além de apresentar musgos e liquens. Em contraste com as árvores das florestas tropicais e temperadas, as coníferas possuem folhas estreitas e afiladas — **folhas aciculadas** — adaptadas para resistir às baixas temperaturas. **(Fig. 17.12)**

▲ **Figura 17.12** • Aspecto geral da taiga, ou floresta de coníferas, bioma típico das regiões subárticas, mas que também ocorre na parte oeste da América do Sul. O alce é um mamífero que vive nas taigas do hemisfério norte.

A fauna da taiga é composta por mamíferos típicos, como alces, ursos, lobos, raposas, visons, martas e esquilos. Como na tundra, a maioria das aves da taiga migra para o sul no inverno.

Floresta temperada decídua

O bioma denominado **floresta temperada decídua** é típico de certas regiões da Europa e da América do Norte, onde o clima é temperado e as quatro estações do ano são bem delimitadas. Na floresta temperada predominam árvores que perdem as folhas no fim do outono e as readquirem na primavera — daí serem chamadas **plantas decíduas** (do latim *deciduus*, que cai) ou **caducifólias** (do latim *caducus*, que cai). A perda das folhas é uma adaptação ao inverno rigoroso, pois permite reduzir a atividade metabólica da planta, necessária para suportar as baixas temperaturas.

Na Europa, as árvores mais características da floresta temperada são os carvalhos e as faias. Na América do Norte, predominam os bordos e também algumas espécies de carvalhos e faias. Além dessas árvores, tanto na Europa quanto na América do Norte estão presentes arbustos, plantas herbáceas e musgos. **(Fig. 17.13)**

▲ **Figura 17.13** • Aspecto geral de uma floresta temperada, bioma típico da América do Norte e da Europa, mas que também ocorre na Rússia, na China e no Japão, assim como na Austrália. As fotos mostram uma floresta temperada no Canadá e um de seus mamíferos típicos, o veado.

Com relação à fauna, a floresta temperada abriga muitas espécies de mamíferos, entre eles javalis, veados, raposas e doninhas, além de pequenos mamíferos arborícolas, como esquilos e arganazes. Vários tipos de pássaros e corujas também podem ser encontrados ali, assim como várias espécies de insetos.

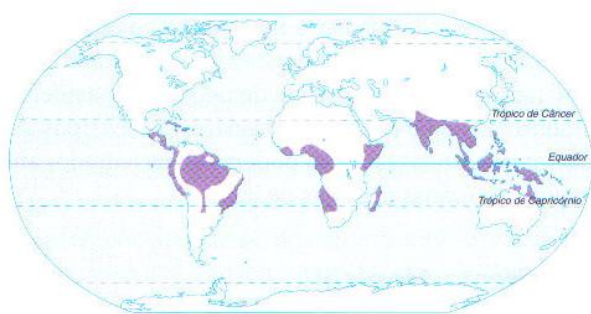
Floresta tropical

O bioma denominado **floresta tropical**, também chamado de **floresta pluvial tropical**, localiza-se em regiões de clima quente e com alto índice pluviométrico, ou seja, na faixa equatorial da Terra. Há florestas tropicais no norte da América do Sul (Bacia Amazônica), na América Central, na África, na Austrália e na Ásia.

A vegetação da floresta tropical é exuberante e com árvores de grande porte, cujas folhas não caem; por isso, as plantas da floresta pluvial tropical são denominadas **perenifólias** (do latim *perennis*, perpétuo, duradouro). Essas plantas têm, em geral, folhas largas e delicadas, denominadas **latifoliadas** (do latim *latus*, largo, amplo, e *folia*, folha).

As copas das árvores mais altas formam um "teto" de vegetação, sob o qual existe um "andar" interno, formado pelas copas de árvores mais baixas. Pode haver andares gradativamente menores, até chegar aos arbustos e às plantas rasteiras. A estratificação resultante dos vários andares de vegetação origina diversos microclimas, com diferentes graus de luminosidade e umidade. Sobre os troncos das árvores, disputando condições melhores de luminosidade, há muitas plantas epífitas, como bromélias e samambaias.

Nas florestas tropicais, a reciclagem da matéria orgânica é muita rápida; folhas que caem e plantas e animais que morrem são rapidamente decompostos, e seus elementos químicos, reciclados. Forma-se no solo uma camada fértil, de cor escura — o húmus —, que resulta da decomposição da matéria orgânica. A derrubada da floresta empobrece rapidamente o solo de nutrientes; sem a cobertura vegetal e a constante reciclagem de elementos químicos, os nutrientes minerais do solo são carreados pelas chuvas, em um processo denominado **lixiviação**.

Na floresta pluvial tropical há grande quantidade de nichos ecológicos, o que permite a existência de fauna rica e variada. Há muitos vertebrados nas árvores, como mamíferos (macacos e esquilos), répteis (serpentes e lagartos) e anfíbios (sapos e pererecas). No solo também vivem anfíbios, répteis, mamíferos herbívoros (veados, antas etc.) e mamíferos carnívoros (onças, gatos-do-mato etc.); há também muitos invertebrados, principalmente insetos (mosquitos, besouros, formigas etc.). **(Fig. 17.14**, na página seguinte**)**.

▲ **Figura 17.14** • As florestas pluviais tropicais são os biomas que apresentam a maior reserva de biodiversidade do planeta. Um dos animais típicos desses biomas são as serpentes.

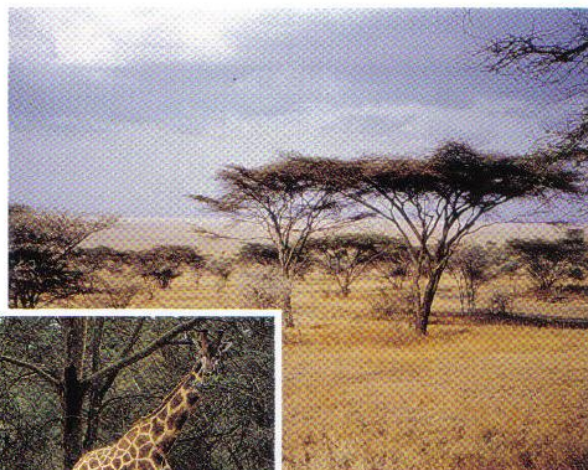
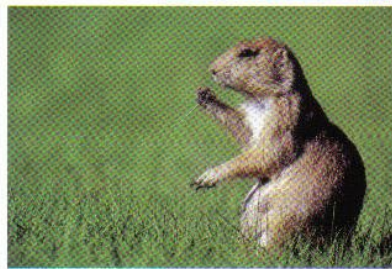
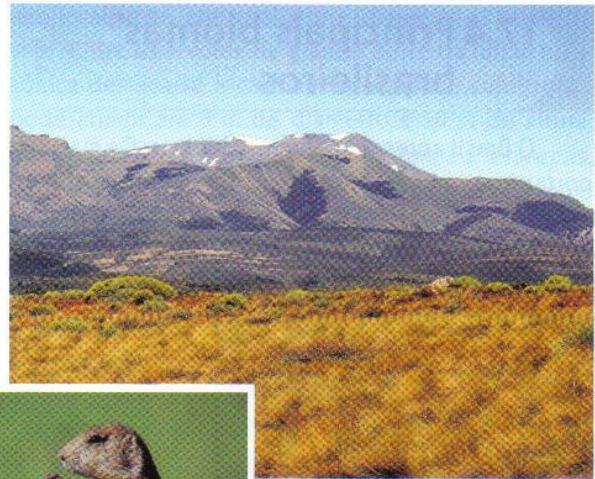
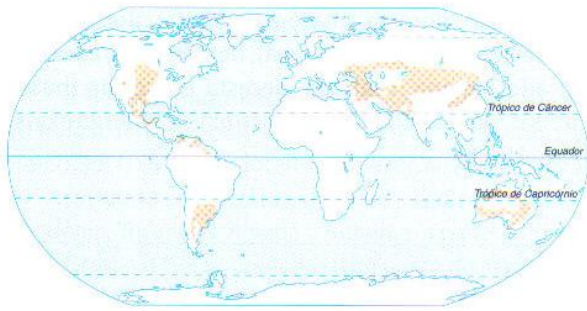
Savana

O bioma do tipo **savana** caracteriza-se por apresentar arbustos e árvores de pequeno porte, além de gramíneas. É encontrado na África, na Ásia, na Austrália e nas Américas. Na savana africana, a fauna compõe-se de variados herbívoros de grande porte (antílopes, zebras, girafas, elefantes e rinocerontes) e de grandes carnívoros (leões, leopardos e guepardos). Há diversas espécies de pássaros, de gaviões e de aves corredoras, entre elas o avestruz. No Brasil, um tipo de savana é o cerrado, que será estudado mais adiante. **(Fig. 17.15)**

Pradaria

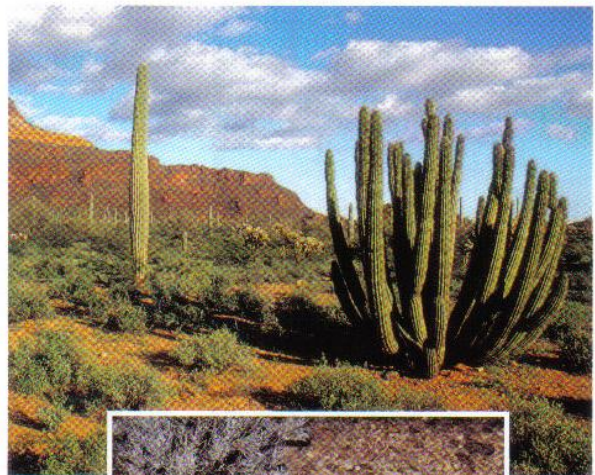
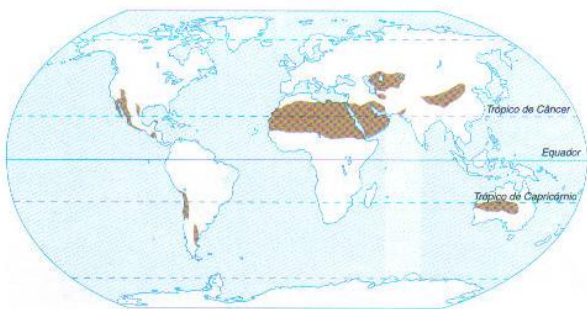
O bioma denominado **pradaria**, ou **campo**, apresenta vegetação constituída predominantemente por gramíneas. Esse bioma é encontrado em regiões com períodos marcados de seca, como certas áreas da América do Norte e da América do Sul. Os pampas gaúchos, que serão vistos adiante, são um tipo de pradaria.

A fauna da pradaria é constituída por roedores (pequenos mamíferos como *hamsters* e marmotas) e carnívoros (lobos, coiotes e raposas). Também são abundantes os insetos. **(Fig. 17.16)**

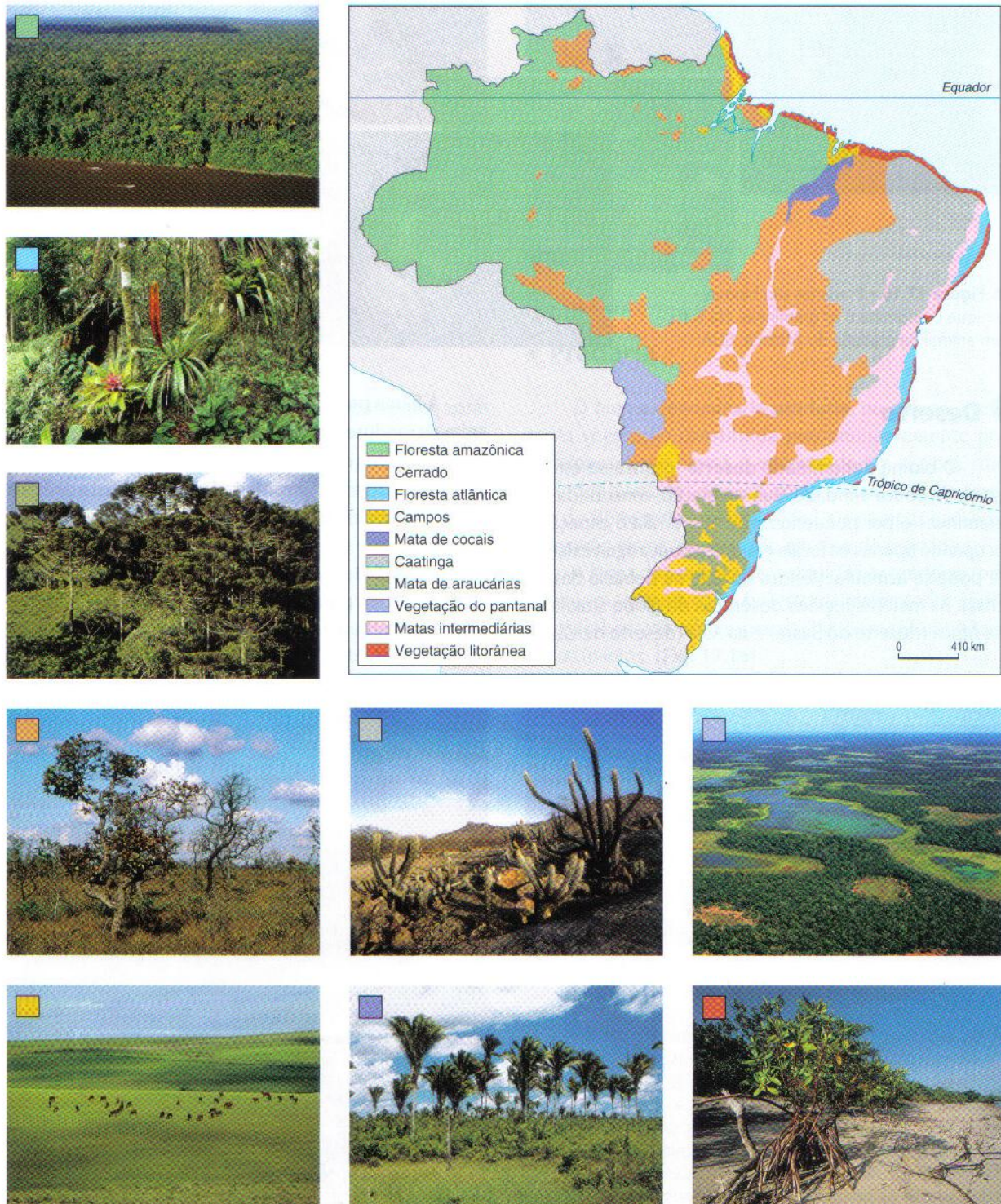
▲ **Figura 17.15** • Aspecto geral de um bioma do tipo savana. A vegetação é formada por arbustos, pequenas árvores e gramíneas. Além de grandes herbívoros, como as girafas, a savana africana tem grandes carnívoros.

▲ **Figura 17.16** • Pradarias são biomas em que predominam as gramíneas. Na foto, um animal da pradaria do Arizona, EUA.

Deserto

O bioma denominado **deserto** localiza-se em regiões de pouca umidade. Sua vegetação, constituída por gramíneas e por pequenos arbustos, é rala e espaçada, ocupando apenas os locais em que a pouca água existente pode se acumular (fendas do solo ou debaixo das rochas). As maiores regiões desérticas do globo situam-se na África (deserto do Saara) e na Ásia (deserto de Gobi).

A fauna predominante no deserto é composta por animais roedores (ratos-cangurus e marmotas), por répteis (serpentes e lagartos) e por insetos. Animais e plantas do deserto têm marcantes adaptações à falta de água. Os cactos, por exemplo, têm espinhos em vez de folhas, o que reduz a área da planta que perderia água por transpiração. Muitos animais saem das tocas somente à noite, e outros podem passar a vida inteira sem beber água, extraindo-a do alimento que ingerem. **(Fig. 17.17)**

▲ **Figura 17.17** • A foto maior, à direita, mostra um bioma de deserto, cujos habitantes desenvolveram adaptações contra a falta de água. Cactos, como os da foto, têm folhas transformadas em espinhos, uma adaptação contra a perda de água por transpiração. Na foto inferior, um rato-canguru que pode passar a vida toda sem beber água, obtendo-a dos alimentos e de reações químicas intracelulares como a degradação de gorduras. Além de não possuir glândulas sudoríparas, esses animais só saem da toca à noite, e sua urina é tão concentrada que apresenta consistência pastosa, semi-sólida.

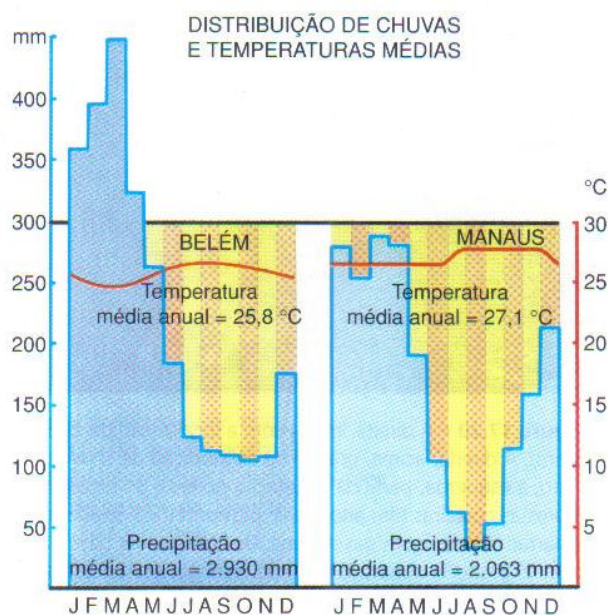
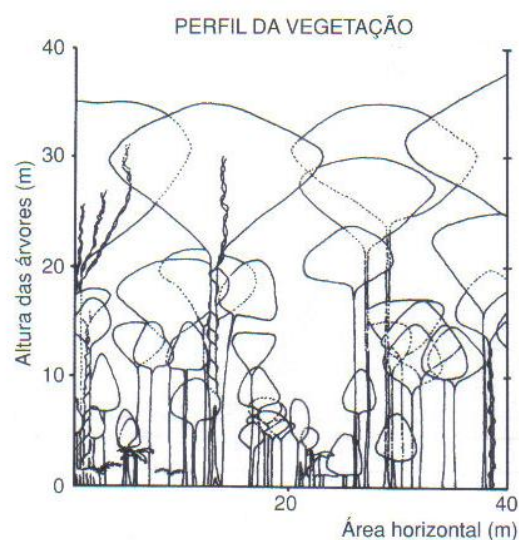
17.4 Principais biomas brasileiros

O Brasil apresenta diversos biomas. Os mais importantes, pela área que ocupam e pela biodiversidade, são: floresta amazônica (hiléia), floresta pluvial costeira (floresta atlântica), floresta de araucárias, cerrado, pampa, caatinga, floresta de cocais (babaçuais), pantanal mato-grossense e manguezais. **(Fig. 17.18)**

▲ **Figura 17.18** • Localização dos principais biomas brasileiros.

Floresta amazônica

A **floresta amazônica**, denominada **hiléia** (do grego *hulaía*, floresta) pelo botânico alemão Alexander von Humboldt (1769-1859), localiza-se na região Norte do Brasil, ocupando os estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Tocantins, Amapá e Roraima, a parte norte de Mato Grosso e Goiás, além da parte oeste do Maranhão. O clima da região amazônica reúne condições propícias ao desenvolvimento de um exuberante bioma do tipo floresta pluvial tropical. As precipitações pluviométricas são superiores a 1.800 mm/ano, e a temperatura é estável no decorrer do ano, situando-se entre 25° C e 28° C.

A floresta amazônica apresenta diversos estratos ou andares formados pelas copas das árvores; o mais alto localiza-se, em geral, entre 30 m e 40 m acima do solo. Entre as árvores de grande porte da hiléia amazônica destaca-se a castanheira-do-pará, cujo tronco pode atingir até 3 m de diâmetro e 50 m de altura. Muitos gêneros de árvores, como *Virola* e *Pterocapus*, apresentam raízes tabulares que fornecem maior apoio ao tronco. Uma das árvores mais conhecidas da região amazônica é a **seringueira** (*Hevea brasiliensis*), que pode atingir até 30 m de altura, com tronco de mais de 1 m de diâmetro. É do tronco da seringueira que se extrai o látex, a partir do qual é fabricada a borracha natural. Embora a borracha sintética venha sendo cada vez mais utilizada, a exploração da borracha natural ainda é muito importante para a economia da região amazônica. **(Fig. 17.19)**

▲ **Figura 17.19** • Acima, mapa com a localização da floresta amazônica no território brasileiro. No alto, à direita, Ilustração de um perfil de floresta tropical, mostrando os diversos estratos (andares) arbóreos, formados pelas copas das árvores de diversas alturas. À direita, gráficos da distribuição de chuvas e das temperaturas médias ao longo do ano, em Belém (PA) e em Manaus (AM). As fotos mostram aspectos da região amazônica. **A.** Extração de látex. **B.** Lago com vitórias-amazônicas. **C.** Sumaúma com raízes tabulares. **D.** Macaco-de-cheiro.

A floresta amazônica é rica em plantas epífitas, entre as quais se destacam grandes bromeliáceas. Há também epífitas da família das aráceas e begoniáceas, cujas raízes aéreas chegam até o solo, constituindo densas cortinas de cipós.

Floresta pluvial costeira (floresta atlântica)

O bioma denominado **floresta pluvial costeira**, ou **floresta atlântica**, situa-se nas montanhas e planícies costeiras, desde o Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul. A região sul do Espírito Santo e de Cabo Frio, no Rio de Janeiro, são as únicas áreas onde esse bioma não se desenvolveu originalmente. A floresta atlântica tem árvores com folhas largas (latifoliadas) e perenes (perenifólias), como as da floresta amazônica. A altura média do andar superior oscila entre 30 m e 35 m, mas a maior densidade da vegetação é a do andar arbustivo. Há grande diversidade de epífitas, como bromélias e orquídeas.

Na Bahia, extensas áreas de florestas costeiras foram totalmente destruídas para dar lugar a plantações de cana-de-açúcar, cacau e banana. No sul desse estado, além de haver culturas de cana-de-açúcar e banana, as florestas costeiras têm sido exploradas para extração irregular de palmito. A floresta atlântica é um dos biomas mais devastados pela exploração humana; calcula-se que restem apenas 5% das florestas costeiras que havia por ocasião da chegada dos primeiros colonizadores europeus. **(Fig. 17.20)**

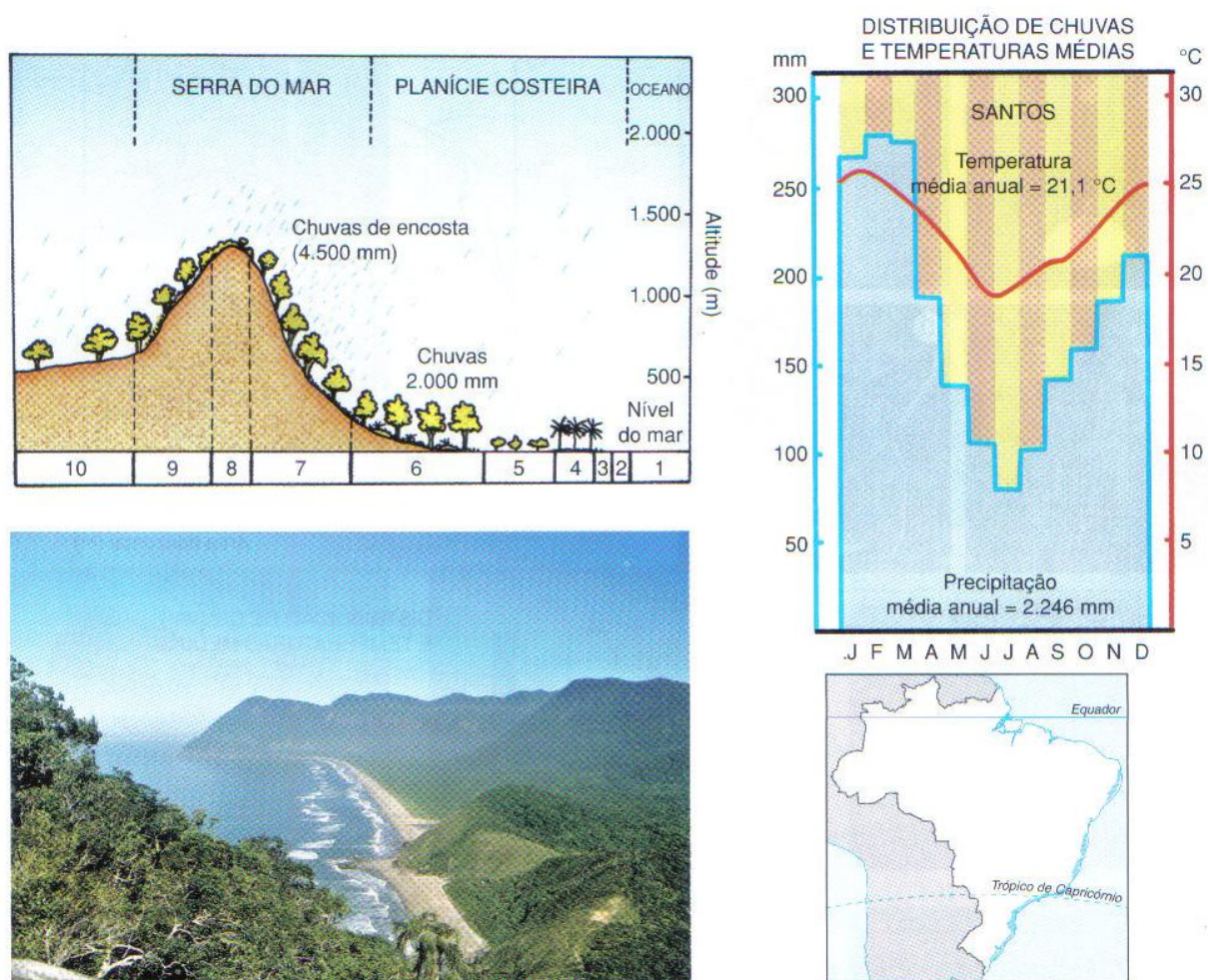
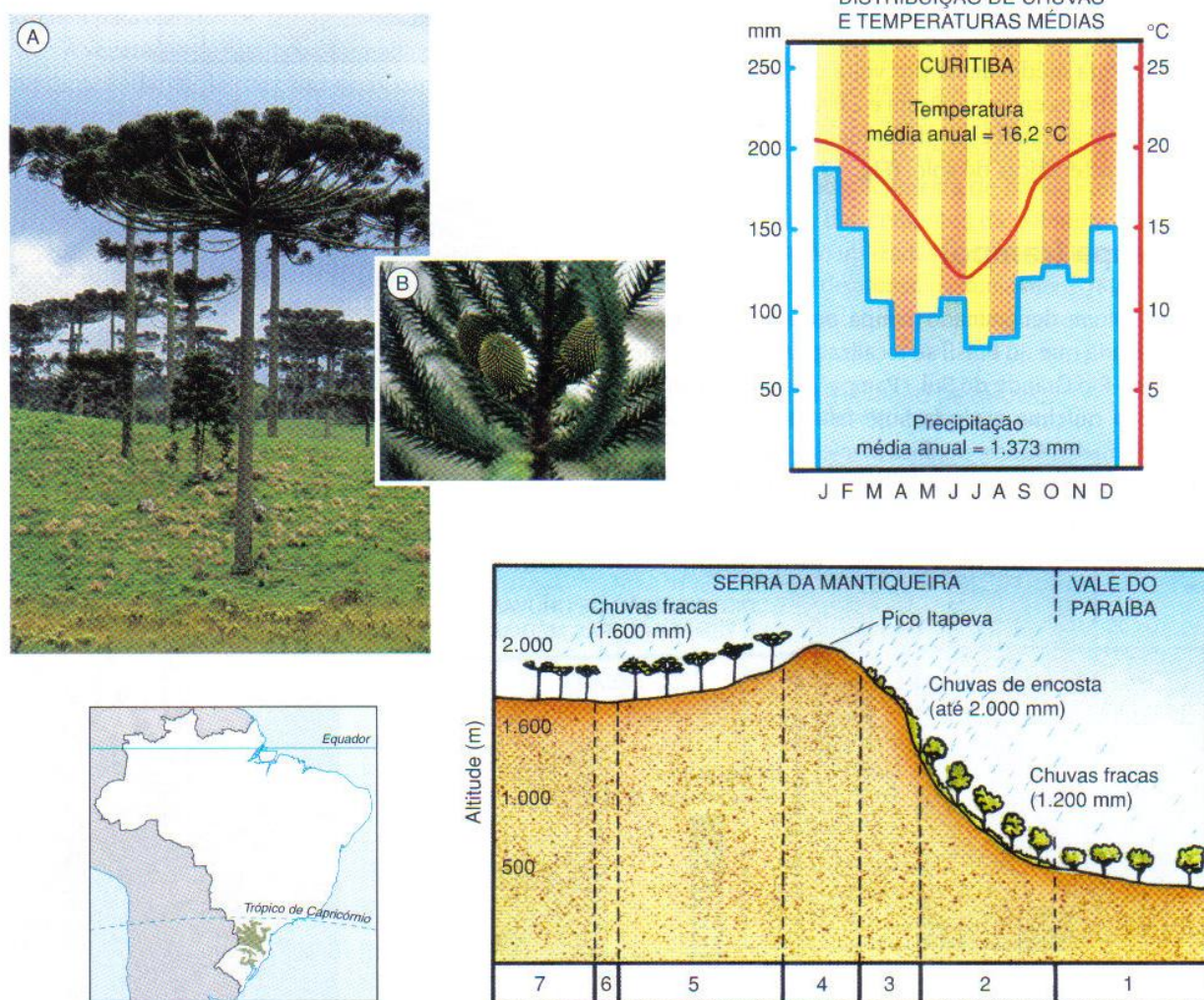



Figura 17.20 • À direita, mapa com a localização do bioma conhecido como mata atlântica (floresta pluvial costeira). À direita, acima, gráfico da distribuição de chuvas e de temperaturas médias na região de Santos (SP). No alto, à esquerda, perfil da vegetação no leste do estado de São Paulo (segundo K. Hueck, 1962). As florestas costeiras têm alto índice pluviométrico devido às "chuvas de encosta", causadas pelas montanhas que barram a passagem das nuvens. Os números na base da figura identificam as seguintes regiões: 1) mar; 2) praia; 3) dunas; 4) mata de restinga; 5) manguezal; 6) mata pluvial costeira; 7) mata de encosta; 8) mata de neblina; 9) mata semi-seca do Vale do Paraíba; 10) região seca à "sombra" da montanha. A foto mostra uma área de mata atlântica na região da Juréia, SP.

Floresta de araucárias

A **floresta de araucárias** situa-se nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo, em regiões com índices pluviométricos em torno de 1.400 mm anuais e temperaturas moderadas, com baixas significativas no inverno, lembrando as condições climáticas das florestas de coníferas da América do Norte e da Europa.

A floresta de araucárias apresenta três andares vegetais bem definidos. O andar arbóreo é constituído principalmente pelas copas do pinheiro-do-paraná, ou pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*), e do pinheiro do gênero *Podocarpus*. O pinheiro-do-paraná, a popular **araucária**, é a árvore mais característica desse bioma, chegando a atingir 25 m de altura e troncos de até 1,5 m de diâmetro.

O andar arbustivo é muito denso, com diversos tipos de arbusto e samambaias arborescentes do gênero *Dicksonia*. Os "troncos" dessas samambaias, formados por rizomas secos e compactados, constituem o xaxim, explorado irregularmente para a fabricação de vasos. No andar herbáceo há gramíneas formando a vegetação rasteira. Podem ser encontradas, também, plantas epífitas como orquídeas e bromélias. **(Fig. 17.21)**

▲ **Figura 17.21** • Acima, à esquerda, mapa com a localização do bioma conhecido como mata de araucárias, localizado no sul do Brasil. À direita, perfil da vegetação na região do Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira. Os números na base da figura identificam as seguintes regiões: 1) mata semi-seca do Vale do Paraíba. 2) mata pluvial costeira; 3) mata de neblina; 4) campos de altitude; 5) mata de araucárias; 6) mata de podocarpos; 7) mata de araucárias. No alto, à direita, gráfico da distribuição de chuvas e das temperaturas médias na região de Curitiba (PR). As fotos mostram uma vista geral de uma mata de araucárias. (**A**) estróbilos femininos de *Araucaria*, no qual se formam pinhões, as sementes comestíveis da araucária (**B**).

Cerrado

O bioma denominado **cerrado** situa-se nos estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e no oeste de São Paulo e Paraná. Há também algumas "ilhas" de cerrado na região amazônica.

O cerrado é um bioma do tipo savana, com vegetação arbórea esparsa formada por pequenas árvores e arbustos, muitos deles com casca espessa. O solo, na estação das chuvas, é relativamente rico em gramíneas, que desaparecem na época das secas. As árvores do cerrado geralmente têm casca grossa e troncos retorcidos; dentre as espécies mais comuns estão o ipê (*Tabebuia*), a peroba-do-campo (*Aspidosperma tomentosum*) e a caviúna (*Dalbergia sp*).

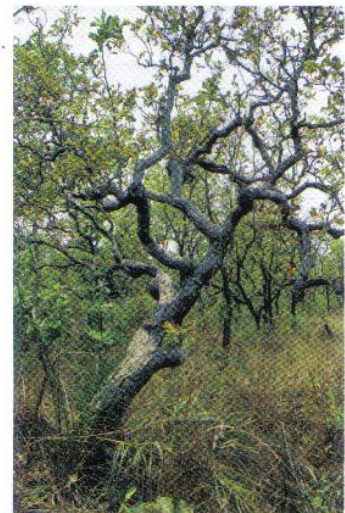
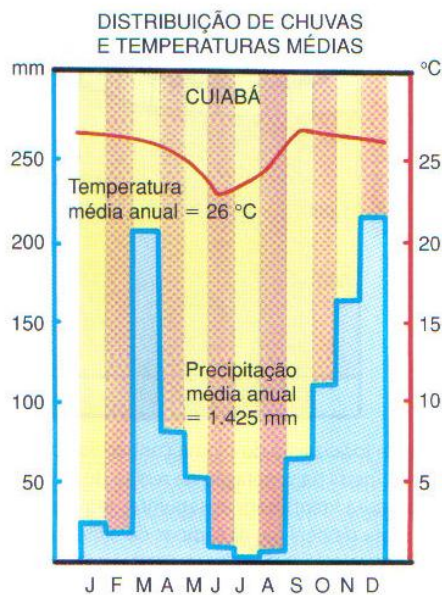
O clima do cerrado é relativamente quente, com temperatura média anual por volta de 26° C e índices pluviométricos entre 1.100 mm e 2.000 mm por ano, mas sua vegetação parece ser determinada principalmente pelas características do solo. **(Fig. 17.22)**

Pampa (campo)

O bioma denominado **pampa**, ou **campo**, é um tipo de pradaria que no Brasil se localiza principalmente no norte do Rio Grande do Sul. "Pampa", palavra da língua indígena quíchua e ainda hoje falada por povos da cordilheira dos Andes, significa planície. Os pampas ocupam áreas de planície e caracterizam-se pela predominância de gramíneas. Eventualmente podem ser encontrados pequenos bosques de arbustos no interior do pampa, mas são formações isoladas, que não chegam a quebrar a homogeneidade do bioma.

O índice de chuvas no pampa fica entre 500 mm e 1.000 mm anuais. A temperatura varia de acordo com a estação: no inverno, entre 10° C e 14° C; no verão, entre 20° C e 23° C. A maior parte da vegetação original do pampa foi destruída para dar lugar a áreas cultiváveis. **(Fig. 17.23)**

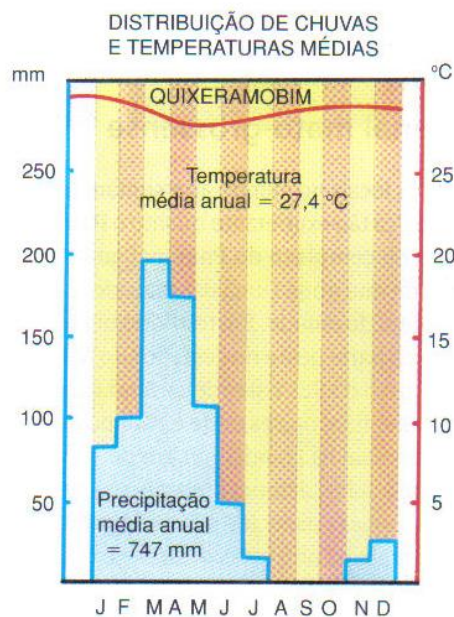
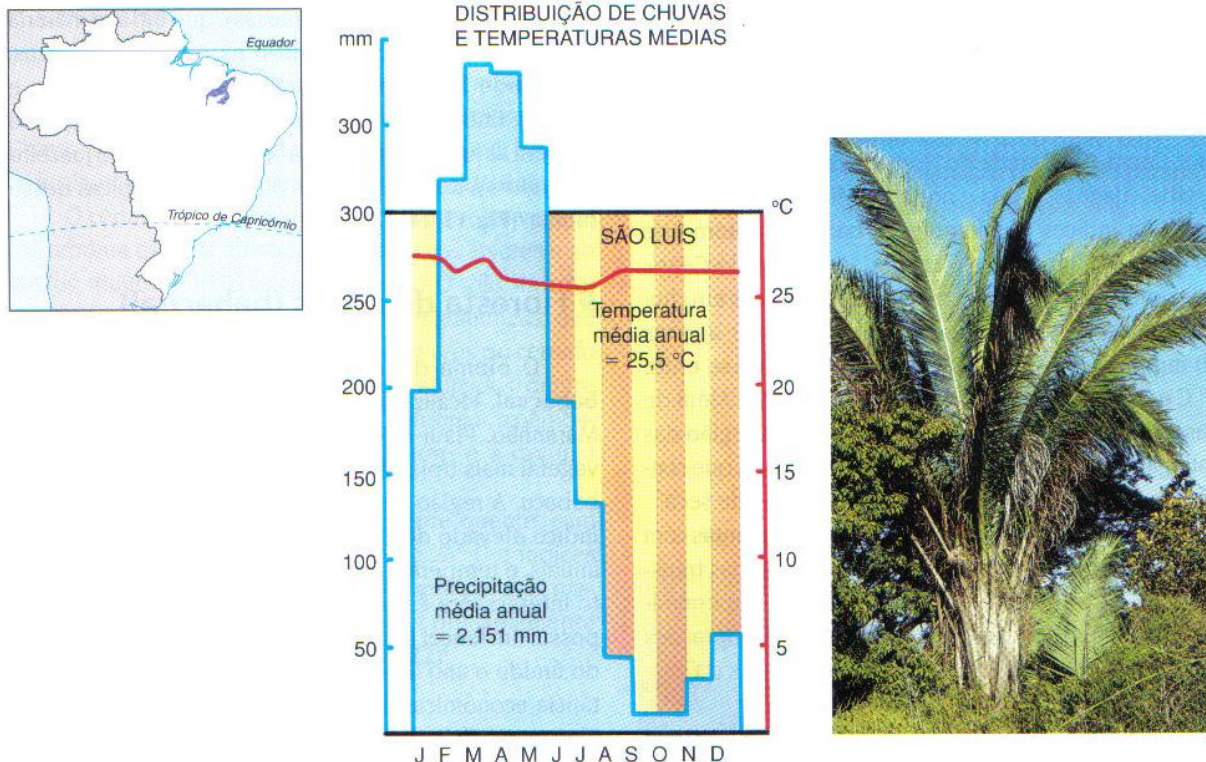
▲ **Figura 17.23** • O mapa mostra a localização do bioma conhecido como pampa ou campo limpo, um tipo de pradaria. A vegetação predominante nos campos compõe-se de gramíneas. O pampa apresenta vegetação herbácea, com raras espécies arbóreas. Uma das utilizações desse bioma é para a criação de gado.

▲ **Figura 17.22** • Acima, mapa com a localização do bioma conhecido como cerrado, um tipo de savana. No centro, gráfico da distribuição de chuvas e de temperaturas médias na região de Cuiabá (MT). À direita, vegetação típica do cerrado.

Caatinga

A **caatinga** é um bioma que ocupa cerca de 10% do território brasileiro, estendendo-se pelos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia e norte de Minas Gerais. A caatinga tem índices pluviométricos baixos, em torno de 500 mm a 700 mm anuais. Em certas regiões do Ceará, por exemplo, embora a média para os anos ricos em chuvas seja de 1.000 mm, pode chegar a chover apenas 200 mm, nos anos secos. A temperatura situa-se entre 24° C e 26° C, variando pouco ao longo do ano. Além de suas condições climáticas serem rigorosas, a região das caatingas está submetida a ventos fortes e secos, que contribuem para a aridez da paisagem nos meses de seca.

A vegetação da caatinga é formada por plantas com marcantes adaptações ao clima secó, como folhas transformadas em espinhos, cutículas altamente impermeáveis, caules que armazenam água etc. Essas adaptações compõem o aspecto característico das plantas da caatinga, denominadas **xeromórficas** (do grego *xeros*, seco, e *morphos*, forma, aspecto). São plantas cactáceas, como *Cereus* (mandacaru e facheiro) e *Pilocereus* (xiquexique), e também arbustos e árvores baixas, como mimosas, acácias e amburanas (leguminosas), que em sua maioria perdem as folhas (caducifólias) na estação das secas, conferindo à região seu aspecto típico, espinhoso e agreste. Entre as poucas espécies da caatinga que não perdem as folhas na época da seca, destaca-se o juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), uma das plantas mais típicas desse bioma. **(Fig.17.24)**

Floresta de cocais (babaçual)

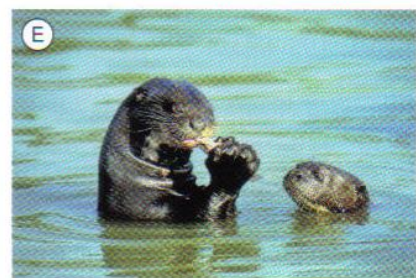
O bioma denominado **floresta de cocais**, ou **babaçual**, localiza-se em certas áreas dos estados do Maranhão, Piauí e Rio Grande do Norte; sua espécie vegetal mais típica é a palmeira *Orbignya martiana*, o babaçu. A região onde ocorre a floresta de cocais tem índice elevado de chuvas, entre 1.500 mm e 2.200 mm anuais, e temperatura média anual de 26° C. Um aspecto interessante é que o solo, na região dos babaçuais, possui um lençol freático pouco profundo, permanecendo úmido o ano todo. A floresta de babaçu tem importância econômica; das sementes da palmeira extrai-se óleo, e as folhas são utilizadas para a cobertura de casas e para a fabricação de utensílios domésticos. **(Fig. 17.25, na página seguinte)**

▲ **Figura 17.24** • No alto, mapa com a localização do bioma do tipo caatinga. À direita, gráfico da distribuição de chuvas e de temperaturas médias na região de Quixeramobim (CE). A foto mostra o aspecto de uma caatinga na região de Nova Canudos, BA.

▲ **Figura 17.25** • No alto, à esquerda, mapa com a localização do bioma conhecido por mata de cocais (ou babaçual), formada principalmente pela palmeira chamada babaçu (*Orbygnia martiana*). No centro, gráfico da distribuição de chuvas e de temperaturas médias na região de São Luís (MA). À direita, palmeira de babaçu. Das sementes dos frutos de uma palmeira adulta podem-se extrair, anualmente, cerca de 20 litros de óleo, utilizado na culinária e na indústria.

Pantanal mato-grossense

Poucos locais no mundo apresentam uma comunidade biológica tão exuberante quanto o **Pantanal mato-grossense**, ou **complexo do Pantanal**, uma vasta planície inundada que abriga uma das mais ricas reservas de vida selvagem do mundo. Em território brasileiro, o Pantanal ocupa a parte oeste dos estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul. Estende-se ainda pelo Paraguai, Bolívia e Argentina, países onde é conhecido por *chaco*.

No Pantanal há grande número de espécies vegetais, a maioria delas também presente em outros biomas brasileiros; poucas espécies são endêmicas, isto é, exclusivas da região. Entre estas destaca-se o carandá, uma espécie de palmeira parecida com a carnaúba, que forma bosques conhecidos como carandazais. Em algumas áreas do rio Paraguai pode-se encontrar a vitória-amazônica, planta típica da floresta amazônica. Em alguns locais mais elevados, onde o solo não retém água da chuva, a vegetação pode apresentar a feição típica da caatinga, com cactos, barrigudas e gravatás. Nas áreas que são inundadas durante as cheias anuais, crescem diferentes tipos de gramíneas, além de arbustos e árvores isoladas, formando extensas pastagens naturais.

O complexo do Pantanal é constituído por uma fauna aquática muito variada, que se beneficia das cheias periódicas. Além de moluscos e crustáceos, há centenas de espécies de peixes, entre eles o dourado, o pacu, o jaú, o pintado, o surubim, os lambaris e as piranhas. Durante as cheias, os peixes abandonam os leitos dos rios e saem à procura de alimento nos campos e nas florestas inundados. No fim da estação das cheias, quando as águas começam a baixar, eles retornam aos leitos dos rios, formando enormes cardumes que migram para as águas calmas dos brejos e nascentes para desovar. Esse fenômeno é conhecido como **piracema**.

A fauna aquática do Pantanal garante a existência de mais de 200 espécies de aves, entre as quais garças, tuiuiús, colhereiros, cabeças-secas, socós e saracuras. Há também répteis, como o jacaré-do-pantanal e o jacaretinga, que se alimentam de peixes. Entre as serpentes, a espécie mais impressionante é a sucuri, não-venenosa, que pode atingir até 10 m de comprimento. Entre os mamíferos destacam-se as capivaras, roedores de grande porte que podem atingir até 70 kg de peso. Há ainda onças-pardas, onças-pintadas, ariranhas, macacos, porcos-do-mato e veados. **(Fig. 17.26)**

▲ **Figura 17.26** • No alto, à esquerda, mapa com a localização do Pantanal mato-grossense, uma planície inundada localizada na região centro-oeste da América do Sul. A parte brasileira situa-se nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Acima, foto aérea do pantanal na região de Poconé, MT. As fotos mostram alguns representantes típicos da fauna do Pantanal: **A.** Jacaré-do-pantanal, cuja sobrevivência é ameaçada pelos "coureiros", caçadores de pele; **B.** Tamanduá-bandeira; **C.** Araras-azuis; **D.** Cervo-do-pantanal; **E.** Ariranha.

Antes da chegada dos europeus, o Pantanal era habitado por grandes populações de diferentes nações indígenas: bororos, guanás, paiaguás, guatós e guaicurus. Cada um desses povos tinha seu modo particular de vida e havia desenvolvido uma relação de dependência e equilíbrio com o meio ambiente pantaneiro. A chegada dos colonizadores rompeu esse equilíbrio. A introdução do cavalo pelos espanhóis, no século XVII, por exemplo, contribuiu para grandes mudanças no relacionamento entre as tribos. Os índios guaicurus, uma nação guerreira, domesticaram cavalos que haviam retornado à condição selvagem e se tornaram hábeis cavaleiros, passando a dominar outras populações indígenas. Segundo consta, graças a seu espírito guerreiro e habilidades de cavaleiro, os guaicurus ajudaram os combatentes do Exército brasileiro durante a Guerra do Paraguai.

No século XVIII descobriu-se ouro na região de Cuiabá, atualmente capital do estado de Mato Grosso. Recentemente, a atividade de garimpo de ouro retornou ao Pantanal, agora utilizando mercúrio, um metal líquido à temperatura ambiente e altamente tóxico. O ouro é encontrado na forma metálica, misturado com areia e cascalho, no fundo dos rios ou no meio de rochas. Muitas vezes esse metal está na forma de um pó muito fino, difícil de ser separado com a bateia. Para otimizar o processo de extração de ouro os garimpeiros misturam mercúrio ao cascalho aurífero. O mercúrio forma uma liga com o ouro (o amálgama), facilitando sua separação do cascalho. Em seguida, para separar o ouro do mercúrio, o amálgama é aquecido com maçarico; o mercúrio evapora, mas logo volta à forma líquida, em minúsculas gotas, contaminando o solo e a água dos rios.

O mercúrio acumula-se nos organismos vivos em concentrações progressivas ao longo das cadeias alimentares. Os últimos elos da cadeia aquática são peixes carnívoros que, ao ser consumidos pelas pessoas, causam envenenamento por mercúrio. A contaminação por mercúrio é particularmente grave na região de Poconé, na parte norte do Pantanal. Na Serra do Urucum há mineração de ferro, manganês e calcário. Embora a mineração, em si, cause poucos impactos ambientais, em geral localizados e de pequena expressão, o beneficiamento dos minérios utiliza carvão vegetal, o que leva à destruição de florestas nativas.

A caça e a pesca predatórias têm tido forte impacto sobre o bioma do Pantanal. O mercado de peles, especialmente de jacarés, onças, jaguatiricas, ariranhas e lontras, além da captura de aves raras, coloca em risco a sobrevivência de diversas espécies. **(Fig. 17.27)**

▲ **Figura 17.27** • Ameaças ao ecossistema pantaneiro. **A.** Queimadas. **B.** Peles de onças-pintadas e de outros animais apreendidas pela fiscalização. **C.** Área devastada pelo garimpo em Poconé, MT.

Apesar de tudo isso, a comunidade biológica do Pantanal ainda se mantém relativamente bem preservada. A utilização e o manejo inteligente dos recursos naturais permitirá que o Pantanal mato-grossense continue sendo uma das mais importantes reservas de vida selvagem do planeta.

Manguezais

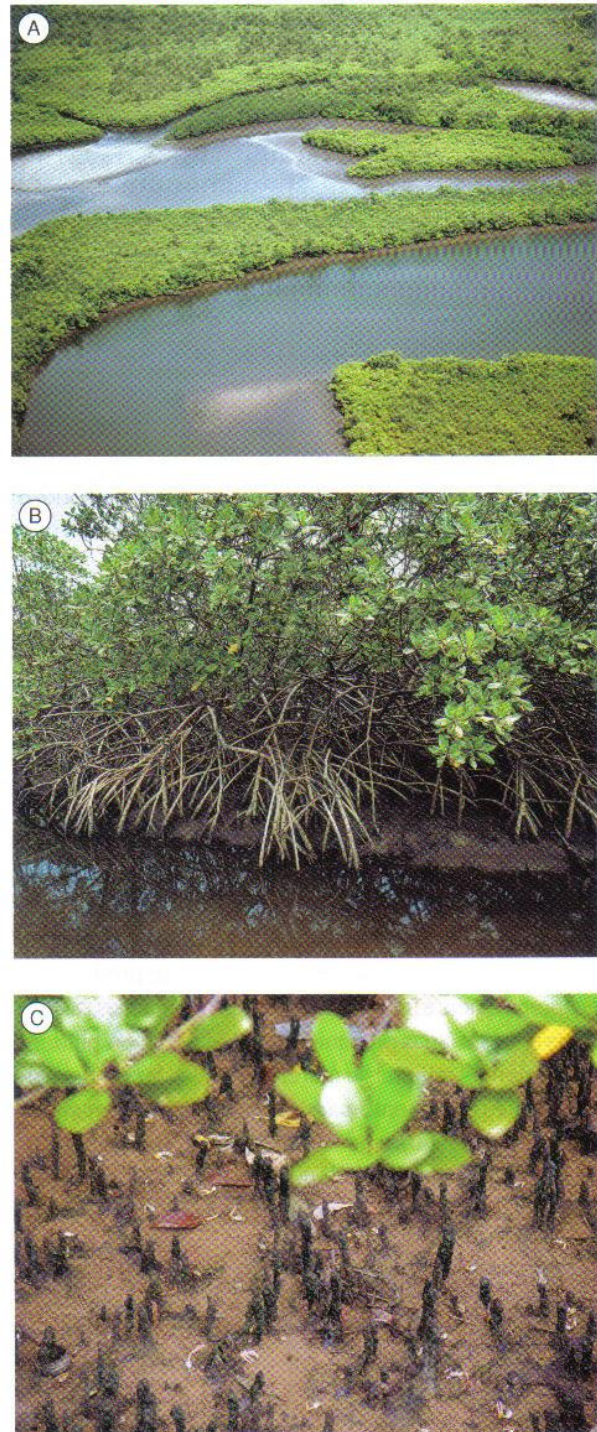
Os **manguezais**, ou **mangues**, são biomas litorâneos com vegetação arbustiva característica, onde o solo é lodoso e salgado. Formam-se junto a desembocaduras de rios e em litorais protegidos da ação direta do mar, tais como baías de águas paradas ou litorais guarnecidos por diques de areia. Durante a maré cheia, o solo do mangue fica coberto por água salgada.

Os manguezais estendem-se por toda a costa brasileira, com interrupção nas regiões de litoral rochoso. Existem mangues bem desenvolvidos no Pará, Amazonas, Maranhão, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná.

Os manguezais não se restringem estritamente à orla marítima; eles podem penetrar vários quilômetros no continente, seguindo o curso dos rios cujas águas se misturam com o mar durante as marés cheias. Em Belém (PA) e São Luís (MA), a vegetação típica de mangue penetra até cerca de 40 km pelo interior. Mangues internos também são encontrados no litoral sul de São Paulo (na região de Cananéia) e no litoral norte do Paraná (nas regiões de Ararapira e do Parque Nacional do Superagüi).

A distribuição tão ampla dos manguezais, em estados do norte e do sul, mostra que esse bioma é pouco afetado pelo clima; suas características se devem predominantemente aos chamados **fatores edáficos**, isto é, relativos ao solo. Este é formado por areia fina e lodo, e apresenta teor variado de sal, dependendo de sua proximidade e contato com a água do mar. Por estar constantemente alagado, o solo do mangue é pobre em gás oxigênio, o que determina a sobrevivência de apenas bactérias anaeróbicas produtoras de gás sulfídrico, que conferem a esse bioma um cheiro característico. **(Fig. 17.28)**

Com relação à vegetação predominante, pode-se distinguir três tipos de manguezal: o chamado "mangue-vermelho", em que predomina a espécie *Rhizophora mangle*, popularmente conhecida como "mangue-bravo"; o "mangue-branco", em que predomina a espécie *Lagunaria racemosa*, popularmente chamada "mangue-manso" e o "mangue-seriba", em que predominam espécies do gênero *Avicennia*. Esses três tipos de mangue estão presentes, juntos ou separados, nas diversas regiões do Brasil. Não há vegetação rasteira nos manguezais, e são poucas as plantas epífitas presentes, entre elas algumas orquídeas e bromélias.

A planta *Rhizophora mangle* é um arbusto facilmente identificado por seus **rizóforos** (antigamente chamados de raízes-suporte), ramos caulinares com formato arqueado que penetram no solo, onde eventualmente formam raízes adventícias. Os rizóforos são adaptações ao solo pouco firme do manguezal, conferindo maior área de sustentação às plantas. A *Rhizophora mangle* atinge, normalmente, entre 3 m e 6 m de altura, mas em mangues mais internos pode chegar a 12 m.

▲ **Figura 17.28** • **A.** Vista aérea de região de manguezal em Florianópolis (SC). Os manguezais são biomas litorâneos amplamente distribuídos pela costa brasileira; suas características dependem mais do solo alagado e salgado do que do clima. **B.** O mangue-bravo (*Rhizophora mangle*) possui rizóforos, ramos que funcionam como escoras e constituem adaptações à sustentação no solo mole do manguezal. **C.** As plantas do gênero *Avicennia* têm raízes especiais denominadas pneumatóforos, que crescem eretas e emergem do solo alagado, garantindo a obtenção de gás oxigênio necessário à respiração das raízes.

A *Avicennia tomentosa*, popularmente chamada "siriúba", ocorre mais freqüentemente nos manguezais próximos à orla marítima. Sua principal característica é apresentar raízes cujas extremidades afloram perpendicularmente ao solo, os **pneumatóforos**, ou **raízes respiratórias**. Trata-se de adaptações ao solo encharcado do manguezal, que permitem às raízes obter gás oxigênio do ar.

Outra adaptação curiosa apresentada pela *Avicennia* é a germinação da semente dentro do fruto, ainda presa à planta-mãe, fenômeno conhecido como **viviparidade**. A jovem planta resultante da germinação tem uma raiz reta e duas folhas opostas, assumindo o aspecto de um dardo. Ao cair, a raiz orienta-se perpendicularmente e penetra, como uma seta, no solo lodoso. Essa adaptação evita que a semente seja sepultada pelo lodo e deixe de germinar.

As plantas do manguezal apresentam elevado potencial osmótico em suas células, isto é, elas têm vacúolos cheios de soluções altamente concentradas. Trata-se de uma adaptação fisiológica relacionada com a absorção de água pelas raízes. Graças ao potencial osmótico elevado, essas plantas desenvolvem alto poder de sucção celular, o que é necessário para retirar, por osmose, água do solo salgado.

Nos manguezais vivem diversas espécies de caranguejos e moluscos. Também são encontradas aves aquáticas, entre as quais garças e diversas espécies de pássaros.

Os manguezais são regiões altamente produtivas e economicamente importantes para as populações caiçaras que vivem em suas proximidades. A alta disponibilidade de nutrientes minerais e matéria orgânica faz do mangue uma fonte de alimento para diversas espécies marinhas e para a espécie humana. Grande número de peixes, moluscos e crustáceos, além de aves, obtém alimento, direta ou indiretamente, dos manguezais. **(Fig. 17.29)**

17.5 Ecossistemas aquáticos

Ecossistemas de água doce

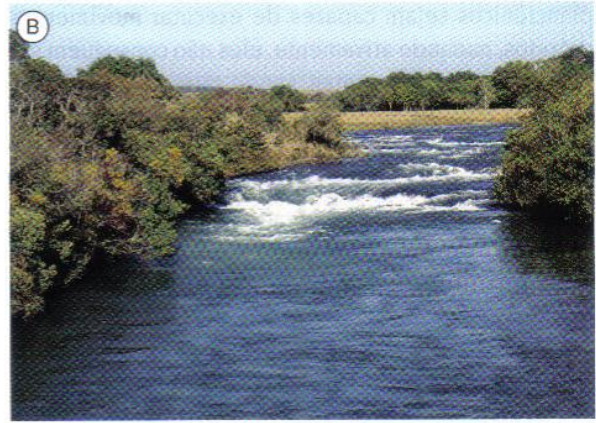
Uma característica importante que distingue os dois tipos de ecossistemas de água doce é se a água é parada, como ocorre nos lagos, lagoas e charcos, ou se está em movimento, como nos rios, riachos e corredeiras.

Lagos, lagoas e charcos geralmente apresentam maior biodiversidade que os ecossistemas de águas em movimento. Nas águas paradas, os produtores são organismos fotossintetizantes representados tanto por plantas que vivem parcialmente ou totalmente submersas quanto pelo fitoplâncton ou plâncton fotossintetizante — constituído por uma infinidade de seres microscópicos como algas verdes, cianobactérias e diatomáceas, que flutuam próximo à superfície. O fitoplâncton serve de alimento ao zooplâncton, ou plâncton não-fotossintetizante, formado por microcrustáceos, protozoários e larvas de diversos organismos. Os habitantes de maior porte dos ecossistemas de águas paradas são os peixes. Os maiores ecossistemas lacustres do mundo são o lago Baikal, localizado na Sibéria, e o lago Tanganica, na África.

Os ecossistemas de águas em movimento são pobres em plâncton. Seus habitantes são principalmente algas fixadas às rochas e também moluscos, insetos e peixes, que dependem de alimento proveniente das margens. **(Fig. 17.30)**

Ecossistemas marinhos

Os mares e oceanos cobrem mais de 3/4 da superfície terrestre, com profundidades que variam de alguns metros, nas regiões litorâneas, a mais de 11 km, nas zo-

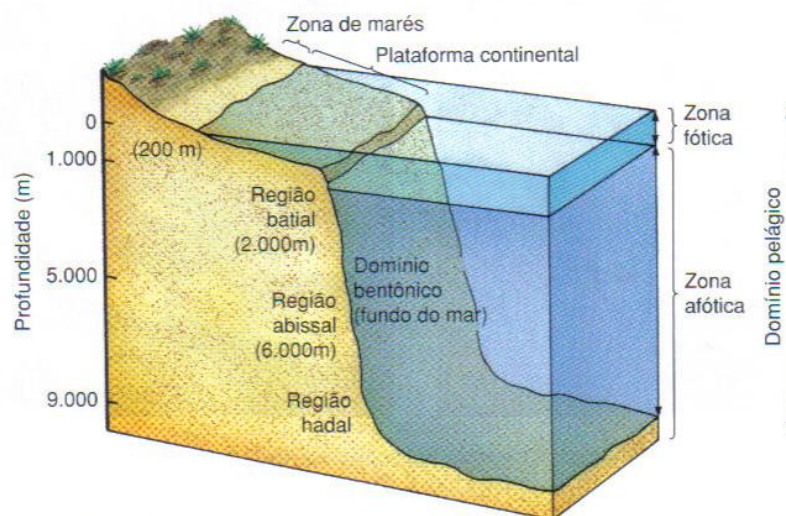
▲ **Figura 17.29** • Animais típicos do mangue. À esquerda, caranguejo-chama-maré. À direita, o mexilhão, popularmente chamado de sururu.

▲ **Figura 17.30** • Um lago (**A**) é um ecossistema de águas sem correntezas, enquanto um rio (**B**) é um ecossistema de águas em movimento.

nas mais profundas. Um dos aspectos mais importantes do hábitat marinho é sua grande estabilidade e homogeneidade, no que se refere à composição química e temperatura. A salinidade dos mares é de cerca de 3,5 g/L de sais, com predominância de cloreto de sódio (NaCl). Podem-se distinguir dois grandes domínios marinhos: um relativo ao fundo, o **domínio bentônico**, e outro relativo às massas d'água, o **domínio pelágico**.

A luz consegue penetrar na água do mar até a profundidade máxima de 200 m, estabelecendo o que se denomina **zona fótica** (do grego *photos*, luz). Abaixo dos 200 m de profundidade não há luz, e essa região escura é denominada **zona afótica**. Na metade superior da zona fótica vive o fitoplâncton marinho, formado por algas fotossintetizantes que produzem praticamente todo alimento necessário à manutenção da vida nos mares. Essa zona também é rica em plâncton não-fotossintetizante e em grandes cardumes de peixes.

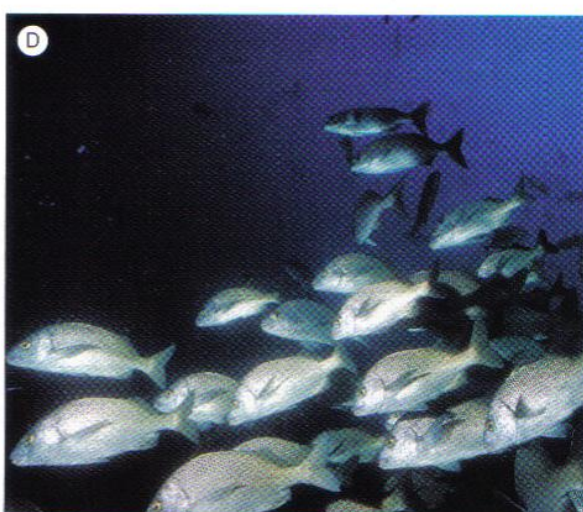
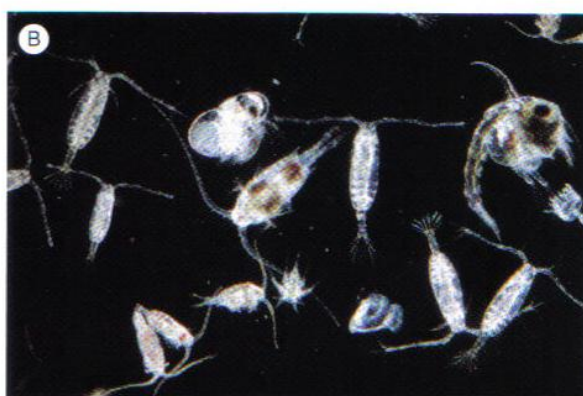
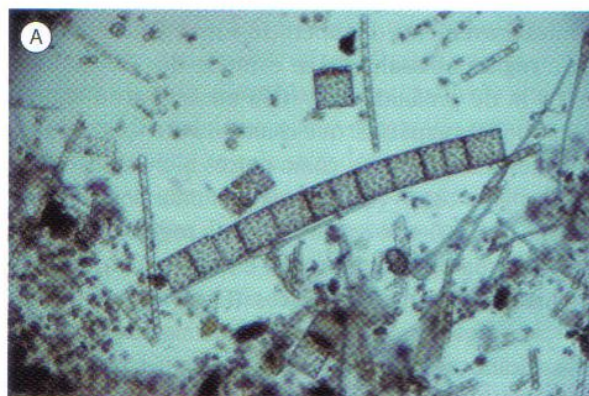
A região que se estende dos 200 m aos 2.000 m de profundidade é a **região batial**. Suas águas são frias e pobres em fauna. Os peixes, moluscos e alguns outros animais que aí vivem são sustentados pela matéria orgânica proveniente da superfície. Em seguida encontra-se a **região abissal**, que se estende dos 2.000 m aos 6.000 m de profundidade. Nela encontram-se apenas umas poucas espécies, que chamam a atenção por suas características exóticas, como peixes bioluminescentes e lulas gigantes. A região mais profunda dos oceanos, abaixo de 6.000 m, é conhecida como **região hadal**. Sua fauna, ainda pouco conhecida, é constituída principalmente por esponjas e moluscos. **(Fig. 17.31)**

Os organismos que habitam os mares podem ser classificados em três grandes grupos: plâncton, bentos e nécton.

O **plâncton** (do grego *plankton*, errante) é constituído de seres flutuantes. Embora alguns organismos

▲ **Figura 17.31** • Principais regiões marinhas.

planctônicos sejam capazes de executar movimentos próprios, nadando ativamente, eles não conseguem superar a força das correntes, sendo carregados por elas. Como já mencionamos, o plâncton é subdividido em duas categorias: plâncton fotossintetizante (fitoplâncton) e plâncton não-fotossintetizante (zooplâncton). O plâncton fotossintetizante é representado por algas microscópicas como as diatomáceas e dinoflagelados. Juntamente com bactérias fotossintetizantes, elas são as principais produtoras das cadeias alimentares marinhas. O plâncton não-fotossintetizante é representado por organismos consumidores como os foraminíferos (protozoários), crustáceos, celenterados, larvas de moluscos, equinodermos, anelídeos e peixes.

O **bentos** (do grego *benthos*, fundo do mar) é constituído de organismos relacionados ao fundo do mar. Os organismos bentônicos podem ser **sésseis**, isto é, fixados ao fundo, ou **errantes**, deslocando-se sobre o fundo. Os animais bentônicos geralmente alimentam-se de cadáveres e detritos orgânicos, embora existam representantes carnívoros que caçam ativamente suas presas. O bentos séssil é representado por algas macroscópicas e por animais como celenterados e vermes. O bentos errante, por sua vez, é representado principalmente por crustáceos (camarões, caranguejos e lagostas), equinodermos (ouriços-do-mar, holotúrias e estrelas-do-mar), e também por moluscos (caramujos e polvos).

O **nécton** (do grego *nektos*, apto a nadar) é constituído de organismos que se deslocam ativamente na água e não estão à mercê das correntezas, como os seres do plâncton. Fazem parte desse grupo a maioria dos peixes, as baleias, os golfinhos, certos crustáceos (camarões) e alguns moluscos (lulas e sépias). Os peixes herbívoros e as baleias são os consumidores secundários mais importantes da comunidade nectônica. Tubarões, peixes, lulas e outros animais carnívoros estão situados em níveis superiores das cadeias alimentares. **(Fig. 17.32)**

▲ **Figura 17.32** • **A.** Fitoplâncton (plâncton fotossintetizante). **B.** Zooplâncton (plâncton não-fotossintetizante), constituído por consumidores de fitoplâncton. **C.** O bentos é composto de animais relacionados com o fundo do mar, como as estrelas-do-mar e as anêmonas. **D.** O nécton é constituído por animais que se deslocam ativamente na água, dos quais os peixes são os representantes mais típicos.

LEITURA

PROCURANDO POR UM REFÚGIO

Por décadas, um homem tem cavado o solo da floresta em busca de pólen de espécies antigas que pudessem comprovar uma teoria

A floresta amazônica reúne a maior diversidade biológica da Terra: cerca de 80 mil espécies diferentes de plantas e 30 milhões de espécies animais

Era uma vez uma exuberante floresta verdejante, que foi encolhendo, ficando amarelada e sem folhas, como uma savana sem fim. Somente uns poucos grupos de árvores restaram como triste lembrança do que foi a floresta amazônica. Não, não se trata de uma visão pessimista do futuro. É assim que uma teoria largamente aceita explica o que aconteceu na região amazônica durante a Idade do Gelo. Essa teoria tem sido largamente aceita por décadas simplesmente porque explica um dos maiores mistérios ecológicos: a enorme biodiversidade das florestas tropicais.

De acordo com essa teoria, enquanto o mundo mergulhava na Idade do Gelo, as florestas tropicais se retraíram e animais como papagaios e macacos tinham de se abrigar nas poucas árvores restantes, que constituíam refúgios, onde animais e plantas evoluíram e se diversificaram. Quando as florestas novamente se expandiram, elas estavam cheias de novas espécies, criando a biodiversidade que se vê atualmente na floresta amazônica. Essa é uma boa explicação, mas nenhum ecologista sério acredita que as coisas tenham ocorrido exatamente assim.

O problema dessa explicação é que ela provavelmente está errada. Por décadas, um homem tem cavado o solo da floresta em busca de pólen de espécies antigas que pudessem comprovar essa teoria. Ele concluiu que a Amazônia tem tido árvores, árvores e mais árvores tão longe quanto se pode ver. Não houve campos, nem savanas. Só florestas. Agora, finalmente o mundo está começando a escutar sua mensagem. Ela faz os pesquisadores procurar diferentes explicações para a biodiversidade tropical. E implica que as florestas tropicais são mais resistentes às mudanças climáticas do que se imaginava.

A floresta amazônica reúne a maior diversidade biológica da Terra: cerca de 80 mil espécies diferentes de plantas e 30 milhões de espécies animais. [*Obs.: trata-se de uma estimativa do autor do texto quanto ao número de espécies que pode haver; o número total de espécies descritas até o momento é da ordem de 2 milhões.*] Foi em 1969 que o geólogo alemão Jürgen Haffer sugeriu a idéia das ilhas

na floresta para explicar a biodiversidade. Nessa época, a teoria adequava-se perfeitamente bem aos estudos que mostravam que a África parecia ter-se tornado mais seca durante a última glaciação. Mas as evidências de que o mesmo teria ocorrido na Amazônia não eram tão claras.

Paul Colinvaux, paleontologista do Laboratório de Biologia Marinha em Woods Hole, Massachusetts, decidiu testar essa teoria. Sua idéia era simples: se fosse possível encontrar um pedaço de solo que preservasse as características dos últimos milênios, ele poderia ser analisado para ver se continha pólen de árvores ou de gramíneas. Se houvesse pouco pólen de árvores e muito pólen de gramíneas, coincidindo com a época da glaciação, a teoria de Haffer ficaria comprovada.

Um dos maiores mistérios ecológicos é a enorme biodiversidade das florestas tropicais

A parte mais difícil era encontrar a amostra de solo adequada. [...] Colinvaux precisava achar um lago que tivesse existido pelo menos nas últimas centenas de milhares de anos, onde sedimentos e grãos de pólen pudessem ter-se acumulado no fundo. O lago Pata, nas florestas do norte do Brasil, parecia promissor. [...] O único problema era chegar lá.

Mas foi compensador. Os pesquisadores conseguiram retirar uma amostra de solo com 6,5 m de comprimento, e a datação pelo carbono radiativo no primeiro metro mostrou cerca de 30 mil anos de história, indo direto ao coração da Idade do Gelo. Colinvaux e seus colegas examinaram criteriosamente a lama à procura de grãos de pólen, encontrando exemplares pertencentes a 450 famílias diferentes de plantas. O que eles encontraram, porém, abalou a teoria dos refúgios. A amostra de solo tinha abundantes evidências de árvores, e nenhuma evidência de aumento no pólen pertencente a gramíneas. [...]

Os resultados, publicados na revista *Science* em 1996, arranharam a hipótese dos refúgios, mas não a derrubaram. É possível que, por uma extraordinária coincidência, o lago Pata pudesse ter estado bem no centro de um refúgio, com árvores em torno dele, enquanto o resto da floresta desapareceu. Então, Colinvaux encontrou outro lago, a 1.500 km do primeiro. [...] e obteve outra amostra do fundo. Novamente, ele encontrou apenas pólen de árvores até mais de 30 mil anos atrás. [...]

As mais sérias objeções às conclusões de Colinvaux vêm dos primeiros estudiosos de uma área chamada Carajás, no norte do Brasil. Em 1991, Maria Lucia Absy e suas colegas encontraram fortes indícios de pólen de gramíneas entre 24.000 e 11.000 anos atrás, período que abarca a última glaciação. Mas Colinvaux descarta que essa área pudesse ser uma savana entre refúgios de floresta. [...]

- **Fonte:** Nicola Jones, *New Scientist*, vol. 169, n. 2275, p. 36. *(Tradução e adaptação nossa)*

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

17.1 Sucessão ecológica

1. O que são espécies pioneiras? Exemplifique.
2. Caracterize sucessão ecológica primária e secundária, dando exemplo de cada uma delas.
3. Conceitue microclima.
4. Ao longo do processo de sucessão ecológica, comente o que ocorre quanto aos seguintes aspectos da comunidade: a) nichos ecológicos; b) biodiversidade e biomassa; c) homeostase.
5. O que é comunidade clímax?

17.2 Fatores que afetam a evolução dos ecossistemas

6. Quais são os principais fatores que afetam o desenvolvimento de uma comunidade biológica?
7. O que é insolação e como é afetada pela latitude e pela inclinação do eixo terrestre?
8. Qual é a relação entre a inclinação do eixo terrestre e as estações do ano?
9. O que é convecção e como está relacionada ao clima terrestre?
10. Como as correntes oceânicas contribuem para o clima da Terra?
11. Como se forma o solo?
12. Que características do solo são importantes para as plantas?
13. O que é lençol freático?

17.3 Grandes biomas do mundo

14. Conceitue e exemplifique bioma.
15. Caracterize tundra.
16. Caracterize taiga.
17. Caracterize floresta temperada decídua.
18. Caracterize floresta tropical.
19. Caracterize savana.
20. Caracterize pradaria.
21. Caracterize deserto.

17.4 Principais biomas brasileiros

22. Caracterize floresta amazônica.
23. Caracterize floresta pluvial costeira (floresta atlântica).
24. Caracterize cerrado.
25. Caracterize pampa.
26. Caracterize caatinga.
27. Caracterize floresta de cocais (babaçual).
28. Caracterize o Pantanal mato-grossense.
29. Caracterize manguezal.

17.5 Ecossistemas aquáticos

30. Que critério se utiliza para dividir os ecossistemas de água doce? Caracterize cada uma dessas divisões.
31. Quais são os grandes domínios marinhos?
32. Com relação à penetração de luz na água dos oceanos, quantas regiões distintas podem ser observadas neles?
33. Como se divide, de acordo com a profundidade, a zona afótica?
34. Caracterize plâncton, bentos e nécton, exemplificando.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

35. Qual das alternativas a seguir traz uma associação **incorreta**?
    a) Pradaria – Plantas epífitas
    b) Deserto – Xeromorfismo
    c) Floresta temperada – Árvores caducifólias
    d) Tundra – Seca fisiológica
36. Apenas uma das alternativas a seguir sobre as características da tundra **não** é verdadeira. Qual é ela?
    a) Bioma de clima frio
    b) Seca fisiológica
    c) Solo encharcado no verão
    d) Vegetação em andares
37. Apenas uma das alternativas a seguir sobre a floresta pluvial tropical **não** é verdadeira. Qual é ela?
    a) Alta biodiversidade
    b) Maioria das árvores caducifólias
    c) Solo rico em nutrientes
    d) Vegetação em andares
38. Exemplos de espécies pioneiras, capazes de colonizar ambientes inóspitos, são
    a) coníferas e musgos.
    b) fungos e protozoários.
    c) gramíneas e liquens.
    d) musgos e insetos.

39. Uma diferença entre sucessão primária e sucessão secundária é
a) o tipo de ambiente existente no início da sucessão.
b) o tipo de comunidade clímax que se estabelece em cada caso.
c) o tempo de duração da sucessão, mais rápido na sucessão primária.
d) o fato de a sucessão secundária levar a menor biodiversidade.

40. Em uma sucessão ecológica sempre ocorre
a) aumento da biodiversidade.
b) aumento da biomassa.
c) aumento da homeostase.
d) aumento do número de relações ecológicas.
e) tudo o que está mencionado nas alternativas anteriores.

41. Zebras pastavam gramíneas quando foram atacadas por um bando de leões. Em que bioma isso deve ter ocorrido?
a) Deserto.
b) Floresta tropical.
c) Floresta temperada.
d) Savana.
e) Tundra.

42. A popular seringueira *Hevea brasiliensis* é típica de qual bioma?
a) Caatinga.
b) Cerrado.
c) Floresta amazônica.
d) Floresta atlântica.
e) Floresta de cocais.

43. Qual dos biomas a seguir tem maiores semelhanças com a mata pluvial costeira?
a) Caatinga.
b) Cerrado.
c) Floresta amazônica.
d) Floresta de cocais.

44. Um bioma brasileiro com arbustos e pequenas árvores retorcidos, cujas características são mais influenciadas pela composição do solo do que pela falta de chuvas, é
a) caatinga.
b) cerrado.
c) floresta amazônica.
d) floresta atlântica.
e) floresta de cocais.

45. O xeromorfismo constitui-se em uma série de adaptações das plantas à seca. Plantas altamente xeromórficas são encontradas no bioma denominado
a) caatinga.
b) floresta amazônica.
c) floresta atlântica.
d) floresta de cocais.

46. Rizóforos e pneumatóforos são adaptações ao solo encharcado, salgado e pouco consistente do bioma conhecido como
a) caatinga.
b) cerrado.
c) mata atlântica.
d) floresta amazônica.
e) manguezal.

Associe cada uma das alternativas a seguir com uma das questões de 47 a 50.
(a) Bentos.
(b) Nécton.
(c) Fitoplâncton.
(d) Zooplâncton.

47. A que grupo pertencem larvas de ostras e microcrustáceos que flutuam na água dos mares?

48. A que grupo pertencem seres fotossintetizantes como diatomáceas, dinoflagelados e algas verdes?

49. A que grupo pertencem animais que nadam ativamente no mar, como peixes e baleias?

50. A que grupo pertencem animais que vivem no fundo marinho, como estrelas-do-mar e vermes poliquetos?

QUESTÕES DISCURSIVAS

51. Descreva o processo de sucessão ecológica em um texto conciso, em que apareçam os seguintes conceitos: espécies pioneiras; nichos ecológicos; comunidades clímax; bioma.

52. Durante a sucessão ecológica rumo ao clímax, discuta o que ocorre com os seguintes fatores:
a) biomassa de comunidade;
b) diversidade de espécies;
c) número de nichos ecológicos disponíveis;
d) dependência do microclima em relação ao clima regional.

53. Em uma comunidade clímax, pode-se dizer que há grande homeostase. O que isso significa?

54. Enumere alguns fatores que podem determinar as características da comunidade clímax em determinada região (por exemplo, o que determina a existência de florestas pluviais tropicais na região equatorial da Terra?).

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

55. (UFC-CE) São organismos pioneiros na sucessão ecológica, que atuam como produtores em lugares inóspitos e que apresentam os sorédios, eficientes estruturas de dispersão, formados por algas envolvidas por filamentos de fungos. Esta caracterização refere-se a
a) micorrizas.
b) liquens.
c) bolores.
d) briófitas.
e) protozoários.

56. (UFJF-MG) As queimadas, comuns na estação seca em diversas regiões brasileiras, podem provocar a destruição da vegetação natural. Após a ocorrência de queimadas em uma floresta, é CORRETO afirmar que
a) com o passar do tempo, ocorrerá sucessão primária.
b) após o estabelecimento dos líquens, ocorrerá a instalação de novas espécies.
c) a comunidade clímax será a primeira a se restabelecer.
d) somente após o retorno dos animais é que as plantas voltarão a se instalar na área queimada.
e) a colonização por espécies pioneiras facilitará o estabelecimento de outras espécies.

57. (Fatec-SP) Vários eventos caracterizam a evolução de uma comunidade biológica durante uma sucessão ecológica.

Assinale a alternativa que contém o conjunto correto desses eventos.

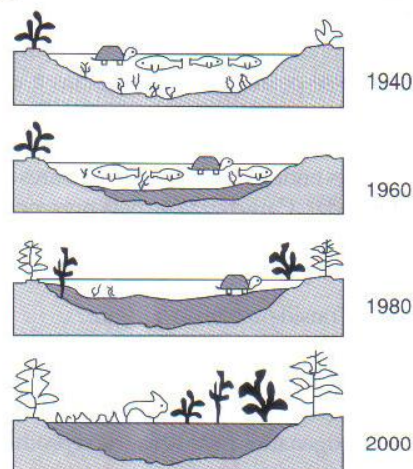
a) Modificações no microclima de uma comunidade em sucessão causam diminuição da diversidade biológica e aumento da biomassa.
b) O aumento da diversidade biológica de uma comunidade em sucessão leva ao aumento da biomassa e, à medida que as novas comunidades se sucedem, ocorrem modificações no microclima.
c) O aumento da biomassa da comunidade em sucessão leva ao aumento da diversidade biológica e à estabilização do microclima.
d) O aumento da diversidade biológica causa modificações no microclima de uma comunidade em sucessão, o que determina a diminuição da sua biomassa.
e) A estabilização do microclima e da biomassa determina o aumento da diversidade biológica de uma comunidade em sucessão.

58. (UFU-MG) Assinale a alternativa correta.

a) A sucessão num ecossistema pode ser descrita como uma modificação em direção a uma grande diversidade e, conseqüentemente, a um número de nichos ecológicos muito maior.
b) A sucessão secundária é aquela que leva a comunidade ao estágio de estabilidade bem alta (epístase), capaz de pronta resposta a modificações físicas, estágio de comunidade clímax.
c) Acredita-se que a baixa estabilidade das comunidades clímax seja devida, basicamente, à sua grande diversidade de espécies. Muitas interações diferentes causam mudanças constantes na comunidade.
d) No estágio inicial, do povoamento de uma área, ou seja, na sucessão primária, diminui a reciclagem de nutrientes e da biomassa total, pois muitas gramíneas são substituídas por árvores.

59. (UFSCar-SP) A substituição ordenada e gradual de uma comunidade por outra, até que se chegue a uma comunidade estável, é chamada sucessão ecológica. Nesse processo, pode-se dizer que o que ocorre é

a) a constância de biomassa e de espécies.
b) a redução de biomassa e maior diversificação de espécies.
c) a redução de biomassa e menor diversificação de espécies.
d) o aumento de biomassa e menor diversificação de espécies.
e) o aumento de biomassa e maior diversificação de espécies.

60. (PUC-RS) Responder à questão com base nas figuras a seguir, as quais ilustram uma única região ao longo dos anos.

Nesta região, ocorreu um processo conhecido por

a) deslocamento de caracteres.
b) irradiação adaptativa.
c) competição interespecífica.
d) sucessão ecológica.
e) convergência evolutiva.

61. (UFSM-RS) Considerando o processo de sucessão, indique se é verdadeira (V) ou falsa (F) cada uma das afirmativas a seguir.

( ) Espécies pioneiras não são capazes de modificar o ambiente, por isso acabam sendo substituídas por outras espécies de plantas e animais.
( ) Comunidade clímax é a comunidade complexa que se estabelece no final de um processo de sucessão.
( ) A sucessão que se estabelece em campos de cultivo abandonados é chamada de secundária.

A seqüência correta é:

a) F - F - V.
b) F - V - V.
c) V - F - F.
d) F - V - F.
e) V - V - V.

62. (UFPR-Adaptado) Sobre as principais regiões fitogeográficas do Brasil, julgue os itens abaixo como verdadeiros (V) ou falsos (F).

a) São muito características no sul do Brasil a vegetação do tipo Tundra e a do tipo Taiga. A primeira é vegetação herbácea, com abundância de liquens e musgos; a segunda caracteriza-se como uma formação florestal com predomínio de coníferas.
b) As duas principais áreas florestadas do país são denominadas Floresta Amazônica e Floresta Atlântica. Ambas apresentam alta diversidade, tanto de espécies vegetais quanto animais.
c) A Floresta com Araucária é uma formação artificial, já que o seu principal elemento, a "*Araucaria angustifolia*", é uma espécie introduzida pelo homem.

d) Os Campos Cerrados e os Pampas são formações vegetais onde há predomínio de plantas lenhosas, com caules tortuosos, de cascas espessas.
e) O Manguezal é vegetação que se desenvolve em regiões onde os rios encontram-se com o mar. Caracteriza-se pelas plantas adaptadas a uma condição de excesso de água.
f) A Caatinga é um tipo de vegetação que ocorre em regiões onde as chuvas são irregulares e as secas prolongadas. Caracteriza-se pela presença de cactáceas e de árvores e arbustos que perdem as folhas durante os períodos de seca.

63. (UFPI) Considere o texto a seguir:
"São encontrados(as) desde o Amapá até Santa Catarina, nos estuários de vários rios, apresentando solos alagados e instáveis, ricos em matéria orgânica e pouco oxigenados e são áreas de reprodução de diversas espécies marinhas."
O texto refere-se
a) às florestas tropicais.
b) às florestas temperadas.
c) aos cerrados.
d) aos manguezais.
e) às matas de araucária.

64. (PUC-RJ) O estado do Rio de Janeiro apresenta diversos ecossistemas, em função da grande variabilidade de sua paisagem. Dentre as características listadas abaixo, destaque a alternativa ERRADA.
a) A mata atlântica é a formação dominante do Rio de Janeiro.
b) As restingas se desenvolvem sobre solos arenosos e constituem o ecossistema mais ameaçado de todos os demais.
c) Os campos de altitude estão localizados principalmente nas serras dos Órgãos e Itatiaia e apresentam grande número de endemismos.
d) A mata atlântica é constituída por florestas secundárias na maior parte do trecho fluminense.
e) Os manguezais estão ligados à existência de um ciclo de marés e apresentam alta diversidade de espécies vegetais.

65. (Ufla-MG) Correlacione o tipo de vegetação com as características da flora.
1. Cerrado
2. Caatinga
3. Floresta tropical
4. Manguezal
5. Zona dos cocais
( ) Presença de árvores que perdem suas folhas periodicamente e de plantas suculentas com folhas transformadas em espinhos
( ) Árvores com troncos tortuosos, de casca grossa, folhas coriáceas e revestidas por pêlos
( ) Ocorrência de árvores com raízes aéreas do tipo escora e respiratórias
( ) Árvores de grande porte e número extraordinário de lianas e epífitas
A seqüência CORRETA é
a) 2, 1, 4, 3
b) 5, 1, 2, 3
c) 3, 1, 4, 5
d) 1, 2, 4, 3
e) 2, 1, 5, 4

66. (UFSM-RS) Numere a coluna inferior de acordo com a superior.
1. Floresta tropical
2. Caatinga
3. Cerrado
4. Campo
5. Pantanal
6. Pinheiral
( ) Ocorre no RS, as gramíneas são a vegetação dominante.
( ) Localizado(a) no Brasil central, com clima quente e períodos alternados de chuva e seca, apresenta árvores esparsas, arbustos e gramíneas.
( ) Possui árvores de grande porte e grande número de trepadeiras e epífitas.
( ) Ocupa a região oeste de MT e MS, ficando alagado(a) nos meses das chuvas; apresenta espécies vegetais típicas do cerrado intercaladas com vegetação aquática e trechos de mata não-alagados.
( ) Estende-se pelos estados do Nordeste, em uma zona quente, com solo portador de nutrientes, apesar de haver secas prolongadas.
A seqüência correta é
a) 6 - 3 - 5 - 1 - 2.
b) 3 - 1 - 5 - 2 - 4.
c) 4 - 2 - 6 - 1 - 5.
d) 4 - 3 - 1 - 5 - 2.
e) 1 - 2 - 5 - 3 - 4.

67. (Fatec-SP) "Nos estuários brasileiros desenvolve-se um ecossistema que apresenta plantas típicas como *'Rhizophora sp'* com raízes escora e *'Avicennia sp'* com pneumatóforos, características que lhes permitem melhor fixação e obtenção de O_2 no solo lodoso deste ambiente."
O texto se refere a
a) cerrado.
b) caatinga.
c) mangue.
d) floresta atlântica.
e) floresta de araucária.

68. (UFU) Assinale a ÚNICA alternativa em que os animais e as plantas ocorrem naturalmente na região dos cerrados (espécies nativas do Brasil).
a) Mangueira, Beija-flor, Pequizeiro, Barata-doméstica e Araucária.
b) Angico, Tamanduá, Pitangueira, Jararaca e Buriti.
c) Orquídea, Boi, Guariroba, Lambari e Condor.
d) Cacau, Mico-leão-dourado, Laranjeira, Mosca-doméstica e Lobo-guará.
e) Macieira, Tatu-canastra, Amoreira, Tico-Tico e Galinha.

QUESTÕES DISCURSIVAS

69. (UFC-CE) O processo de "sucessão ecológica" compreende uma série de estágios do desenvolvimento de uma comunidade. Com relação a esse fenômeno:

a) estabeleça a diferença entre a "sucessão primária" e a "sucessão secundária".

b) explique o significado do termo "comunidade clímax".

70. (Fuvest-SP) Considere dois estágios, X e Y, de um processo de sucessão ecológica.

No estágio X, há maior biomassa e maior variedade de nichos ecológicos.

No estágio Y, há maior concentração de espécies pioneiras e a comunidade está sujeita a variações mais intensas.

a) Qual dos dois estágios representa uma comunidade clímax?

b) Em qual dos estágios há maior biodiversidade? Justifique sua resposta.

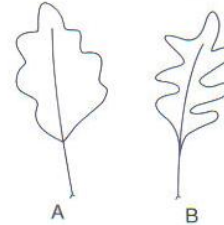
c) Descreva o balanço entre a incorporação e a liberação de carbono nos estágios X e Y.

71. (Unifesp) Considere os grandes biomas do Brasil:

cerrados, florestas, pampas e caatingas.

a) Em qual deles espera-se encontrar maior abundância de anfíbios?

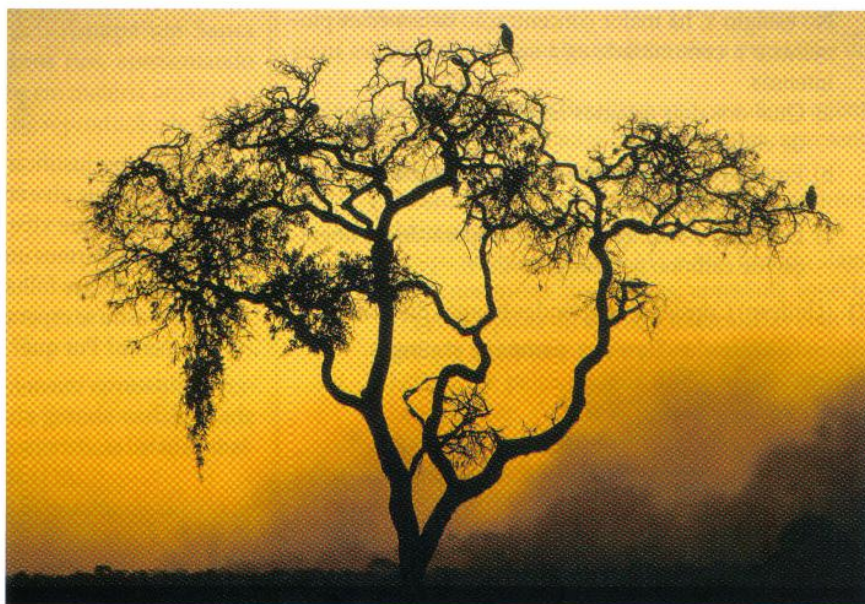
b) Justifique sua resposta, relacionando as características do ambiente com as deste grupo de vertebrados.

72. (Fuvest-SP) Duas plantas da mesma espécie, que vivem em ambientes distintos, apresentam folhas morfologicamente diferentes, representadas nas figuras A e B.

a) Indique, justificando, qual das folhas corresponde à planta que vive em campo aberto e qual corresponde à planta que vive no interior de uma floresta.

b) Se recortarmos um quadrado de mesma área de cada uma dessas folhas e extrairmos a clorofila, de qual amostra se espera obter maior quantidade desse pigmento? Por quê?

CAPÍTULO

18 HUMANIDADE E AMBIENTE

▶ Queimada no cerrado, na região de São João da Aliança, GO.

18.1 O impacto da espécie humana sobre a natureza

O planeta Terra está sob sérias ameaças: poluição, aumento da temperatura global, destruição da camada de ozônio, esgotamento de recursos naturais, extinção de espécies etc. Tudo isso é decorrência do crescimento da população humana e do desenvolvimento industrial e tecnológico, implementados pelo progresso científico. Felizmente, nas últimas duas décadas, muitas pessoas têm percebido a necessidade de empenhar-se em um uso mais racional dos recursos naturais, sob o risco de deixar aos nossos descendentes um mundo inabitável.

Todas as espécies exploram recursos do ambiente, causando algum tipo de "impacto" sobre eles, e a espécie humana não é exceção. Algumas culturas antigas já tinham consciência desse problema, embora não tivessem conhecimentos científicos. No Brasil, por exemplo, algumas tribos da região amazônica ocupavam temporariamente uma região, explorando-a durante certo período. Aos primeiros sinais de esgotamento dos recursos ambientais na vizinhança, como a caça, a pesca e os vegetais, mudavam-se para uma nova região da floresta, deixando que a área antiga se recuperasse do impacto causado pela ocupação prévia.

Nos últimos dois séculos, o desenvolvimento da sociedade industrial e o crescimento explosivo da população humana têm causado impactos ambientais sem precedentes. Muitos recursos naturais estão se esgotando e os resíduos produzidos pela atividade humana acumulam-se no ambiente, degradando-o seriamente. Mas, se somos nós mesmos os causadores dos problemas, não teríamos também a capacidade de resolvê-los? As respostas para esse dilema não são simples. O aumento da população humana e o progresso tecnológico têm levado a uma exploração cada vez

maior dos recursos naturais e estes não são inesgotáveis. A pergunta, então, é: o que esperar para o futuro?

O grande desafio da humanidade, no século XXI, é modificar o antigo conceito desenvolvimentista de progresso, isto é, de aumento da qualidade de vida sem levar em conta os limites da capacidade de suporte do ambiente em que a espécie humana se insere. É necessário refletir sobre o impacto que cada um de nós causa sobre o ambiente, quanto aos recursos que utilizamos e à destinação do lixo que produzimos. Só assim será possível amenizar o impacto da espécie humana sobre o ambiente terrestre e garantir um local habitável para as gerações futuras.

Neste capítulo, apresentamos alguns aspectos problemáticos da relação entre os seres humanos e a natureza. Ao aprender mais sobre esses temas, você estará dando um passo importante não apenas para seu futuro, mas para o de toda a humanidade. Se, além disso, participar das discussões que envolvem temas de proteção e conservação ambientais, de modo a influenciar as decisões assumidas nesse âmbito, estará contribuindo decisivamente para a construção de um mundo mais equilibrado.

18.2 Poluição ambiental

Poluição (do latim *poluere*, manchar, poluir) é a presença concentrada de determinadas substâncias ou agentes físicos no ambiente, genericamente denominados **poluentes**, em geral produzidos pelas atividades humanas. Os poluentes afetam a vida de uma ou mais espécies de organismos de um hábitat.

As atividades humanas, principalmente nas sociedades industrializadas modernas, geram diversos tipos de poluentes: lixo, fumaça e resíduos industriais, gases do escapamento de veículos motorizados etc., além da maior quantidade de resíduos orgânicos, como excrementos e urina. A questão da poluição ambiental é antiga; no século XIX, por exemplo, muitas cidades norte-americanas eram assoladas pela "poluição dos cavalos". O cheiro de suor, de urina e de esterco desses animais estava em todos os lugares. Partículas de esterco seco poluíam o ar. Havia montes de esterco fresco por todos os lados, restos de comida de cavalo e, naturalmente, muitas moscas. Tente imaginar como seriam nossas cidades hoje se todos tivessem um cavalo. Quando surgiram os automóveis, pensou-se que seriam uma solução limpa para os problemas causados pela poluição dos cavalos, mas hoje sabemos que essa previsão não foi acertada.

A poluição ambiental gerada pelas sociedades industrializadas tem provocado tragédias de grandes proporções. Em Londres, no inverno de 1952, as condições climáticas não permitiram a dispersão dos poluentes liberados pelos automóveis, pelas fábricas e pelos sistemas de aquecimento das residências, o que produziu efeitos dramáticos: mais de 4 mil pessoas morreram em poucos dias, em decorrência de problemas respiratórios causados pelos poluentes que se concentraram na baixa atmosfera. Nos dois meses seguintes, mais 8 mil pessoas morreram de enfermidades decorrentes da poluição atmosférica.

Outra catástrofe de grandes proporções ocorreu em Chernobyl, na ex-União Soviética, em 1986. Uma falha na refrigeração de um reator nuclear fez com que ele explodisse, lançando poluentes radioativos que provocaram a morte imediata de dezenas de pessoas e doenças em milhares de outras.

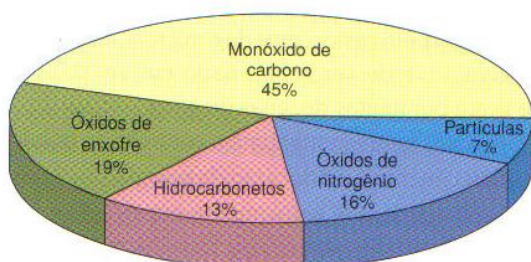
No Brasil, um acidente sério envolvendo material radioativo ocorreu em Goiânia, no estado de Goiás, em setembro de 1987. Uma pessoa removeu parte de um equipamento de radioterapia abandonado e vendeu as peças a um ferro-velho, onde elas foram desmontadas, expondo a cápsula de material radioativo, no caso o **césio 137 (^{137}Cs)**. Admiradas com o brilho emitido pelo material, sem saber do perigo a que estavam expostas, as pessoas manusearam a cápsula e terminaram por quebrá-la, para retirar de seu interior o misterioso pó brilhante, o isótopo radioativo de césio. O pó foi distribuído para várias pessoas; algumas o esfregaram no corpo para torná-lo brilhante; uma criança chegou a engolir o isótopo radioativo.

A cápsula do césio tinha 3 cm de comprimento e 90 g de peso, mas seu conteúdo radioativo espalhou-se por mais de 2.000 m^2, no centro de Goiânia. O resultado foi trágico: 55 pessoas receberam altas doses de radiação; quatro morreram em cerca de um mês: uma mulher, dois jovens e uma criança; 51 pessoas receberam doses de radiação consideradas médias, mas suficientes para elevar drasticamente o risco de doenças futuras, como câncer; 600 pessoas receberam doses baixas, ficando expostas aos riscos da radiação. Além disso, o material contaminado pelo césio, cerca de 6 mil toneladas de lixo radioativo, teve de ser armazenado em um depósito, onde ficará por muitas dezenas de anos.

Um fator fundamental para o controle da poluição é o esclarecimento e a educação da população. Somente uma sociedade civil amplamente organizada e informada será capaz de exercer uma fiscalização ambiental sistemática, exigindo a criação e principalmente o cumprimento de leis ecológicas eficientes. **(Fig. 18.1)**

▲ **Figura 18.1** • Crianças cantando na cerimônia de abertura do *World Summit on Sustainable Development* (Rio + 10) em Johannesburgo, África do Sul. O despertar da consciência ecológica tem levado a sociedade a se organizar, pela necessidade de preservar o ambiente natural para as gerações futuras.

Poluição atmosférica

As principais fontes geradoras da poluição atmosférica são os motores de veículos, as indústrias (siderurgias, fábricas de cimento e papel, refinarias etc.), a incineração de lixo doméstico e as queimadas de campos e florestas. Estas últimas, por exemplo, liberam anualmente na atmosfera milhões de toneladas de gases tóxicos, como monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e hidrocarbonetos, além de partículas que ficam em suspensão. **(Fig. 18.2)**

▲ **Figura 18.2** • Distribuição aproximada dos principais poluentes do ar nas grandes metrópoles.

Um dos poluentes mais perigosos para os habitantes das grandes metrópoles é o **monóxido de carbono** (**CO**), um gás incolor, inodoro, um pouco mais leve que o ar e muito tóxico. Esse gás é produzido durante a queima incompleta de moléculas orgânicas e sua principal fonte de emissão são os motores a combustão de veículos como automóveis, motocicletas, ônibus, caminhões etc. O monóxido de carbono tem a propriedade de se combinar irreversivelmente com a hemoglobina do sangue, inutilizando-a para o transporte de gás oxigênio. A exposição prolongada ao monóxido de carbono pode levar à perda de consciência e à morte; o indivíduo intoxicado por esse gás tem sintomas de asfixia, com aumento dos ritmos respiratório e cardíaco. **(Fig. 18.3)**

▲ **Figura 18.3** • Os principais emissores de monóxido de carbono para a atmosfera são os motores a explosão dos automóveis.

Outro poluente atmosférico é o **dióxido de enxofre** (**SO_2**), um gás tóxico proveniente da queima industrial de combustíveis como o carvão mineral e o óleo diesel, que contêm enxofre como impureza. O dióxido de enxofre, juntamente com o **dióxido de nitrogênio** (**NO_2**) também liberado pela atividade industrial, provocam bronquite, asma e enfisema pulmonar. Além disso, reagindo com vapor d'água da atmosfera, esses óxidos podem formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido nítrico (HNO_3), que se dissolvem na água das nuvens e precipitam com elas nas chamadas **chuvas ácidas**. Em certos países europeus, nos quais a produção de energia é baseada na queima de carvão e óleo diesel, as chuvas ácidas têm provocado grandes danos à vegetação, além de corroer construções e monumentos. **(Fig. 18.4)**

Figura 18.4 • Floresta danificada por chuva ácida em Monte Mitchell, Carolina do Norte, EUA (2002). As chuvas ácidas resultam da poluição da atmosfera por óxidos de enxofre e de nitrogênio liberados na queima de carvão e óleo diesel. A acidez da atmosfera e da água das chuvas, além de destruir a vegetação, corrói construções e monumentos.

Nas cidades modernas há grande quantidade de partículas em suspensão no ar, produzidas principalmente pelo desgaste de pneus e freios de automóveis. Pastilhas de freio, por exemplo, liberam partículas de amianto, que podem causar doenças pulmonares e câncer. Outras grandes fontes poluidoras são as siderúrgicas e as fábricas de cimento, estas últimas responsáveis pela liberação de partículas de sílica (SiO_2). A sílica, como o amianto, quando se encontra na forma de partículas em suspensão no ar, é a causa comprovada de diversas doenças pulmonares, tais como fibroses e enfisemas. A utilização do amianto já é proibida em vários países; no Brasil, onde é utilizado principalmente na fabricação de telhas e de caixas d'água, sua proibição vem sendo discutida.

Inversão térmica

Normalmente, as camadas mais baixas da atmosfera são mais quentes, pelo fato de o ar absorver calor irradiado pela superfície terrestre. Como o ar quente é menos denso, sua tendência é subir, carregando consigo os poluentes em suspensão. O ar quente que sobe é substituído por ar frio que desce, o qual, ao se aquecer, volta a subir. Este movimento ascendente e descendente de ar, denominado corrente de **convecção** (relembre no capítulo 17), é responsável pela dispersão dos poluentes atmosféricos que são continuamente produzidos em uma cidade.

Nos meses de inverno, em conseqüência do resfriamento do solo, a camada inferior de ar atmosférico pode tornar-se mais fria do que a imediatamente acima dela, fenômeno denominado **inversão térmica**. Com isso, a convecção é interrompida e os poluentes deixam de se dispersar para as camadas mais altas da atmosfera, concentrando-se na camada de ar frio aprisionada entre a superfície e o ar quente. Nessas ocasiões, aumentam muito os casos de irritação das mucosas e problemas respiratórios entre habitantes dos grandes centros urbanos. **(Fig. 18.5)**

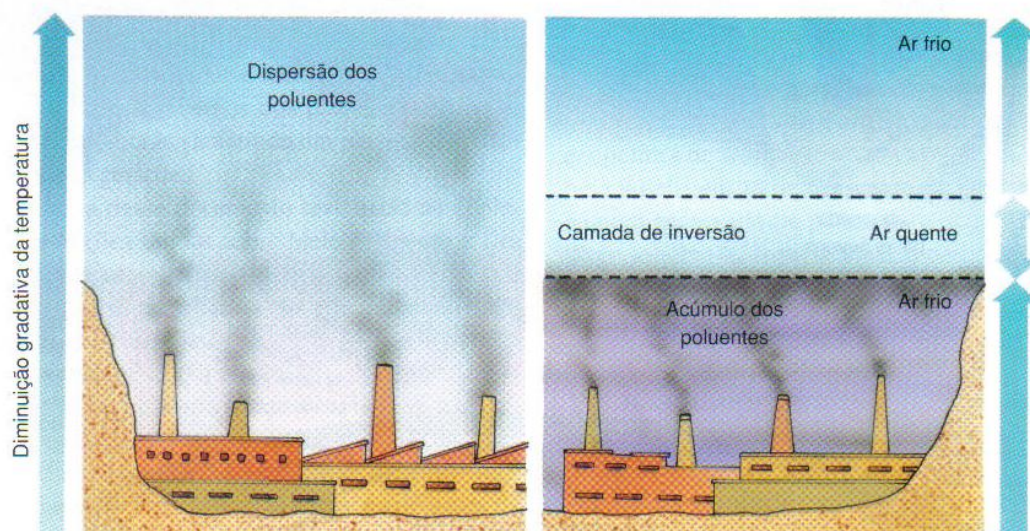



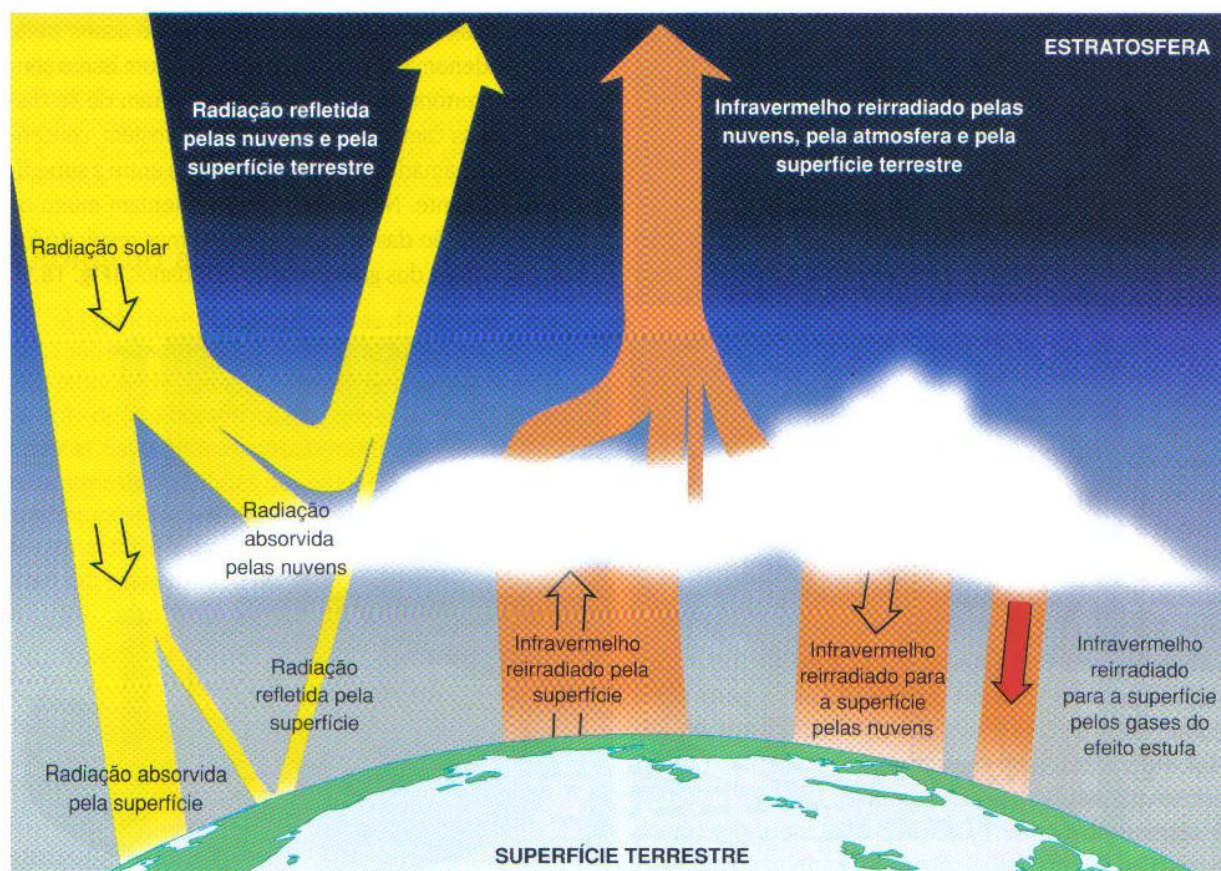
Figura 18.5 • A inversão térmica retém os poluentes junto ao solo, agravando o problema da poluição atmosférica nas grandes cidades.

Aumento do efeito estufa

Parte da radiação solar que chega à Terra é refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre, enquanto outra parte é absorvida. A energia absorvida pela superfície, principalmente, é reirradiada na forma de calor (radiação infravermelha) para a atmosfera, mantendo a superfície terrestre aquecida. Esse fenômeno natural, denominado **efeito estufa**, tem sido importante, desde a origem da vida na Terra, para manter a superfície terrestre aquecida, impedindo a perda rápida de calor para o espaço. Graças ao efeito estufa, a Terra tem se mantido com uma temperatura média compatível com as formas de vida como as conhecemos. Esse fenômeno resulta da presença, entre os gases atmosféricos, de vapor d'água, gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e dióxido de nitrogênio (NO_2), cujas moléculas têm a propriedade de absorver calor.

Muitos cientistas acreditam que está ocorrendo uma intensificação do efeito estufa devido à interferência humana na atmosfera terrestre. Estima-se que, nos próximos anos, a temperatura média na superfície terrestre sofrerá elevação significativa. **(Fig.18.6)**

A quantidade de gás carbônico vem aumentando significativamente na atmosfera desde a Revolução Industrial, quando a humanidade começou a empregar a queima de combustíveis fósseis (carvão mineral e petróleo) em larga escala para produzir energia. Com isso, a concentração de gás carbônico no ar passou, nestes últimos 100 anos, de 0,029% para quase 0,040% da composição atmosférica, o que corresponde a um aumento da ordem de 38%.

Embora sem estimativas precisas, sabe-se que a quantidade de metano (CH_4) presente na atmosfera também vem crescendo. Esse gás resulta da decomposição da matéria orgânica, e sua concentração na atmosfera aumenta proporcionalmente ao crescimento da população. Isso ocorre devido à maior produção de lixo e esgotos e ao aumento das áreas de terrenos alagados, onde se cultiva arroz e há grande decomposição de matéria orgânica. Outras fontes emissoras de metano são os rebanhos de gado bovino e caprino. Por serem ruminantes, esses animais fermentam o alimento em seus tubos digestórios, produzindo e eliminando gás metano, que se incorpora à atmosfera e acentua o efeito estufa.

▲ **Figura 18.6** • Representação esquemática do efeito estufa atmosférico. Analise a figura acompanhando as explicações no texto.

A intensificação do efeito estufa vem despertando polêmicas na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Há preocupações quanto a possíveis modificações climáticas no inverno, que já não parece ser tão frio como antigamente. O ano de 2001 foi o segundo mais quente da história (o mais quente foi 1998 e 2004 foi o quarto), desde que as temperaturas médias anuais no globo terrestre começaram a ser registradas, em 1861. O ano de 2001 foi também o 23º ano seguido a apresentar temperaturas acima da média histórica. Durante o século XX, a temperatura global da superfície terrestre aumentou mais de 0,6° C e, de acordo com estudos da ONU, o planeta deverá estar 2° C mais quente até o ano de 2100.

Já existem registros de desertos se expandindo, cidades costeiras inundadas e grandes alterações climáticas. Alguns cientistas acham conservadoras as estimativas da ONU e acreditam que, se os gases responsáveis pelo efeito estufa continuarem a se acumular na atmosfera, devemos esperar uma elevação de até 4° C na temperatura média mundial, nos próximos 50 anos. Um aumento dessa ordem provocaria grandes mudanças no clima da Terra, com efeitos catastróficos. Nas regiões tropicais, ocorreriam tempestades torrenciais; nas regiões temperadas, o clima poderia tornar-se mais quente e mais seco; nas regiões polares, parte do gelo poderia derreter (o que parece já estar acontecendo), com elevação do nível dos mares e inundação de cidades litorâneas e planícies. Uma inundação da Amazônia, com submersão da floresta, levaria à formação de uma imensa bacia de decomposição, o que produziria mais metano, intensificando ainda mais o efeito estufa.

O Protocolo de Kioto

O Protocolo de Kioto tem sido considerado a mais importante iniciativa para reverter os danos provocados pelo aquecimento global. Esse documento contém orientações para que os governos dos países industrializados possam colaborar, garantindo um planeta saudável para as futuras gerações.

A história desse documento teve início na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992 (ECO-92). Naquela ocasião foi adotada a "Convenção Marco sobre Mudança Climática", ratificada por 175 países, cujo objetivo era a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível seguro para impedir alterações no sistema climático. O compromisso acertado era de os países desenvolvidos reduzirem, para o ano 2000, suas emissões de gases de efeito estufa aos níveis de 1990. Pouco foi feito nos anos seguintes e, em 1997, na terceira Conferência das Partes, realizada na cidade de Kioto no Japão com 10 mil delegados, observadores e jornalistas, foi aprovado o documento, que ficou conhecido como **Protocolo de Kioto**.

Segundo esse protocolo, os países industrializados se comprometem a reduzir, até o período entre 2008 e 2012, suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 (o gás carbônico representa mais de 85% dos gases-estufas liberados na atmosfera). Com isso se obteria uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões iniciadas nesses países há cerca de 150 anos, como resultado da Revolução Industrial.

O protocolo, no entanto, só terá *status* de lei internacional, o que obrigaria os países a cumprirem tais metas, após ser ratificado por um certo número de países. Diversos países já ratificaram, entre eles o Japão, a Austrália e o Canadá, que emitem grandes quantidades de gases poluentes; o governo brasileiro fez a ratificação no primeiro semestre de 2002. Mas o governo dos EUA, que responde por 25% da emissão de gases poluentes no mundo, não ratificou o tratado, com o argumento de que está em busca de medidas alternativas. Para se ter uma idéia da importância dos EUA, em 1997 eles emitiam 20,3 toneladas de gás carbônico por habitante, enquanto em países em desenvolvimento, como a China, essa relação é de apenas 2,5 toneladas por habitante; na Índia é ainda menor, 900 kg por habitante.

Em setembro de 2002 ocorreu, na África do Sul, o Encontro de Johannesburgo, conhecido como Rio+10, ou II Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Seu principal objetivo foi tentar acelerar a aplicação da agenda ecológica mundial, definida na ECO-92, ocorrida dez anos antes no Rio de Janeiro. Infelizmente, a conferência não avançou em relação à Rio-92. A avaliação dominante é que o fracasso da Rio+10 deve-se à postura intransigente dos EUA quanto ao controle das emissões de gases poluentes e da timidez da maior parte dos governos, que não tiveram força ou vontade política para contrapor-se à geopolítica de Washington. Com a ratificação do tratado pela Rússia, em 18 de novembro de 2004, atingiu-se o número necessário de países para que o Protocolo de Kioto se torne lei internacional, a partir de 16 de fevereiro de 2005.

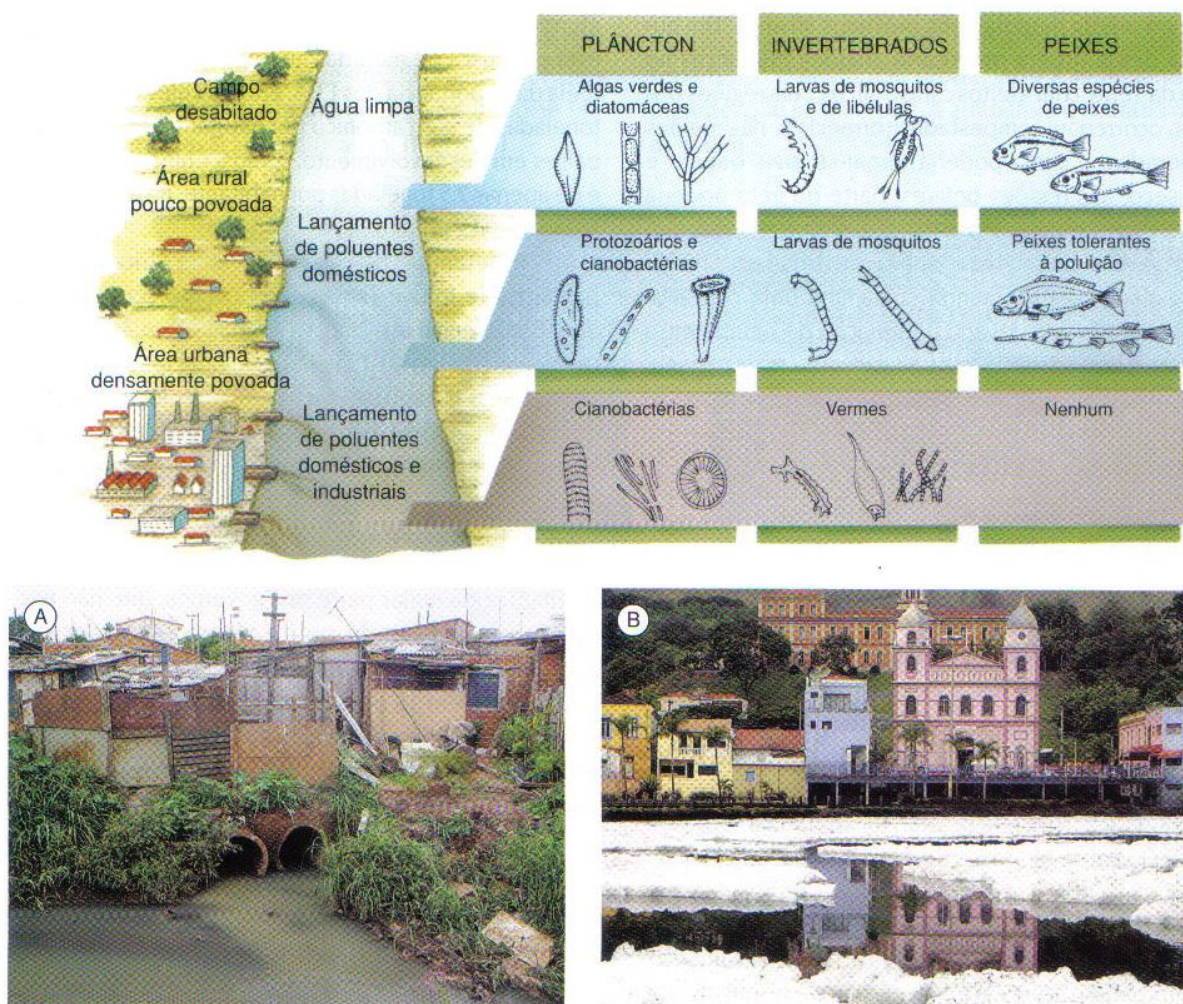
A destruição da camada de ozônio

Na atmosfera terrestre, entre 12 km e 50 km de altitude, forma-se grande quantidade de **gás ozônio (O_3)**, constituindo uma camada que protege o planeta da radiação ultravioleta e funciona como um verdadeiro "filtro solar". O ozônio forma-se a partir do gás oxigênio (O_2) atmosférico, graças à ação da própria radiação ultravioleta solar (relembre no capítulo 14).

Apesar de a presença de ozônio constituir um fator benéfico à vida nas altas camadas atmosféricas, junto ao solo, onde nós vivemos, esse gás é considerado um poluente, pois provoca irritação nos olhos e problemas respiratórios. Nas grandes cidades, os poluentes liberados pelos veículos motorizados potencializam a reação de formação de ozônio na atmosfera e, nos meses de inverno, o problema é agravado pela ocorrência de inversões térmicas.

Poluição das águas e do solo

A forma comum, e talvez a mais antiga, de poluir as águas é pelo lançamento de dejetos humanos e de animais domésticos em rios, lagos e mares. Por serem constituídos de matéria orgânica, esses dejetos aumentam a quantidade de nutrientes disponíveis no ambiente aquático, fenômeno denominado **eutroficação** (do grego *eu*, bem, bom, e *trofos*, nutrição). A eutroficação geralmente leva a uma grande multiplicação de bactérias aeróbicas (isto é, que utilizam gás oxigênio em sua respiração), o que acaba por consumir rapidamente todo o gás oxigênio dissolvido na água. Isso acarreta a morte da maioria das formas de vida aquáticas, inclusive das próprias bactérias aeróbicas.

Devido à eutroficação por esgotos humanos, os rios que banham muitas das grandes cidades do mundo tiveram sua flora e sua fauna destruídas, tornando-se esgotos a céu aberto. O lançamento de esgotos nos rios acarreta, ainda, a propagação de doenças causadas por vermes, bactérias anaeróbicas e vírus. A melhor solução para o problema dos esgotos é seu tratamento e aproveitamento. Atualmente já existem tecnologias para aproveitar a água proveniente de esgotos e para utilizar os resíduos semi-sólidos na produção de fertilizantes e gás metano, o qual pode ser empregado como combustível. **(Fig. 18.7)**

▲ **Figura 18.7** • O lançamento de esgotos e de resíduos industriais nos rios é uma das principais formas de poluição. O aumento da concentração de poluentes causa a alteração da comunidade biológica que habita o rio, o que pode levar à sua eliminação. **A.** Esgoto doméstico sendo lançado em córrego da Favela São Marcos, Campinas, SP (2002). **B.** Rio Tietê poluído com espuma, Pirapora do Bom Jesus, SP (2003).

O lançamento de águas servidas das casas e de resíduos industriais no ambiente constitui um sério problema ecológico. Substâncias poluentes, como detergentes, ácido sulfúrico e amônia, envenenam os rios e causam a morte de muitas espécies da comunidade aquática. O desenvolvimento da agricultura também tem contribuído para a poluição do solo e das águas. Fertilizantes sintéticos e agrotóxicos (inseticidas, fungicidas e herbicidas), utilizados em quantidades abusivas nas lavouras, poluem o solo e as águas dos rios, eventualmente intoxicando o próprio agricultor e sua família e matando diversos seres vivos dos ecossistemas.

Marés vermelhas

Em alguns casos, a eutroficação pode levar à grande proliferação de dinoflagelados (protistas fotossintetizantes), causando o fenômeno conhecido como **maré vermelha**, devido à coloração que os dinoflagelados conferem à água. As marés vermelhas causam a morte de milhares de peixes, principalmente porque os dinoflagelados competem com eles pelo gás oxigênio, além de liberarem substâncias tóxicas na água (relembre esse assunto no volume 2 desta coleção).

Concentração de poluentes ao longo das cadeias alimentares

Desde a década de 1940, inseticidas do grupo dos organoclorados, principalmente o DDT (**d**icloro**d**ifenil**t**ricloretano), são utilizados nas lavouras devido à sua alta eficiência contra diversos insetos. Entretanto, se absorvido pela pele ou se contaminar os alimentos, o DDT pode causar doenças do fígado, como a cirrose e o câncer, tanto em animais quanto em humanos. Devido aos problemas que causa, o uso do DDT está proibido em diversos países.

O DDT, além de outros inseticidas e poluentes, possui a capacidade de se concentrar no corpo dos organismos que o absorvem. Animais como os moluscos bivalves, por exemplo, que obtêm alimento filtrando a água circundante, podem acumular grandes quantidades do inseticida no corpo, em concentração até 70 mil vezes maior que a da água contaminada. Se consumidos por pessoas ou por animais como alimento, esses moluscos podem causar graves intoxicações.

Em determinados ecossistemas, o DDT é absorvido pelos produtores e consumidores primários, passando para os consumidores secundários, e assim por diante. Como cada organismo de um nível trófico superior geralmente come diversos organismos do nível inferior, o DDT tende a se concentrar nos níveis tróficos superiores. **(Fig. 18.8)**

Para solucionar a poluição causada por resíduos industriais e agrícolas é preciso empregar simultaneamente várias ações, como exigir maior controle governamental sobre as indústrias que produzem fertilizantes e agrotóxicos, proibir a comercialização de produtos comprovadamente tóxicos e perigosos, como o DDT, e realizar campanhas educativas junto aos agricultores sobre o emprego correto e não abusivo de defensivos agrícolas e fertilizantes.

A biotecnologia também tem oferecido alternativas ao uso de agrotóxicos, produzindo variedades de plantas cultivadas resistentes a pragas. Outra solução alternativa aos inseticidas é o controle biológico, em que certas espécies podem ser utilizadas para combater pragas. Os pulgões de plantas, por exemplo, causadores de grandes prejuízos a determinadas lavouras, podem ser combatidos pela introdução controlada de joaninhas, que se alimentam deles e de outros insetos, sem causar desequilíbrios na teia alimentar. **(Fig. 18.9**, na página seguinte**)**.

▲ **Figura 18.8** • Diversas substâncias poluentes, como inseticidas e metais, concentram-se nos níveis tróficos superiores das cadeias alimentares. A figura representa as etapas de aumento de concentração do inseticida DDT, em partes por milhão (ppm), nos diversos níveis de uma cadeia alimentar.

▲ **Figura 18.9** • Joaninhas da espécie *Coccinella septempunctata* comendo afídios da espécie *Microlophium carnosum*. Os cientistas pesquisam relações ecológicas desse tipo como maneira de enfrentar as pragas por meio do controle biológico.

Poluição por mercúrio

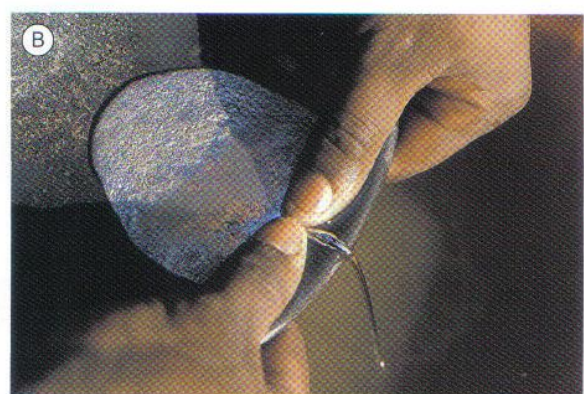
Um problema que vem atingindo proporções preocupantes em certas regiões brasileiras, particularmente na Amazônia e no pantanal mato-grossense, é a poluição pelo mercúrio. Os garimpeiros utilizam esse metal para separar o ouro do cascalho. Grandes quantidades de mercúrio, lançadas nas águas dos rios nas regiões de garimpo, envenenam e matam diversas formas de vida (relembre no capítulo 17). Peixes envenenados pelo metal, se consumidos pelas pessoas, podem causar sérios danos ao sistema nervoso. **(Fig. 18.10)**

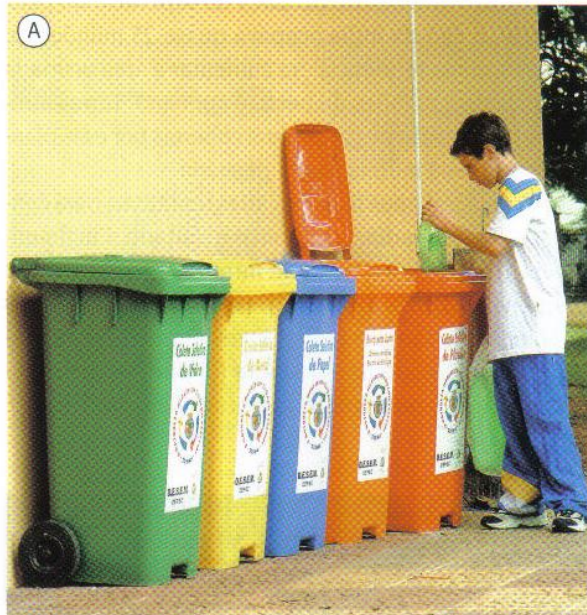
O problema do lixo urbano

Nos países desenvolvidos, uma pessoa produz, em média, cerca de 2,5 kg de lixo por dia. Devido ao crescimento demográfico das cidades, é fácil perceber que em breve não haverá mais áreas para depositar tanto lixo. Enterrá-lo não é solução, pois ele pode contaminar lençóis de água subterrânea que suprem os mananciais utilizados pela própria população produtora de lixo. Queimar o lixo contribui para agravar ainda mais a poluição atmosférica, além de representar um grande desperdício de recursos tendo em vista que o lixo pode ser reaproveitado.

Uma solução para o problema do lixo é sua **reciclagem**, isto é, seu reaproveitamento. Entretanto, para isso é fundamental separar seus diversos componentes, processo conhecido como **triagem** do lixo; latas, por exemplo, podem ter seu metal reaproveitado. O Brasil é um dos maiores recicladores de latas de alumínio do mundo. Plásticos e papel podem também ser reciclados. Calcula-se que se os EUA reciclassem 50% do papel que utilizam, em vez dos 20% que reciclam atualmente, poderiam deixar de cortar cerca de 100 milhões de árvores por ano.

A parte orgânica do lixo, uma vez separada, pode ser degradada por microrganismos em tanques chamados **biodigestores**. Na biodigestão, forma-se o metano (CH_4), também chamado **gás natural**, que pode ser aproveitado como combustível residencial, industrial ou em veículos motorizados. Os resíduos sólidos da biodigestão podem ser utilizados como fertilizantes do solo.

A reciclagem é ainda muito cara, sendo mais fácil e barato utilizar matéria-prima natural que matérias recicladas. Nesse cálculo, no entanto, não se está considerando a degradação ambiental, o que poderá significar um custo altíssimo para as gerações futuras. No entanto, com o progressivo esgotamento dos recursos naturais e o avanço das tecnologias de reciclagem, no futuro, o reaproveitamento do lixo deverá ser superior a 50%.

▲ **Figura 18.10** • O garimpo do ouro causa grande impacto ambiental. **A.** Erosão causada pelo garimpo no estado do Pará, em 1999. **B.** Utilização do mercúrio na produção do amálgama para separação do ouro do cascalho.

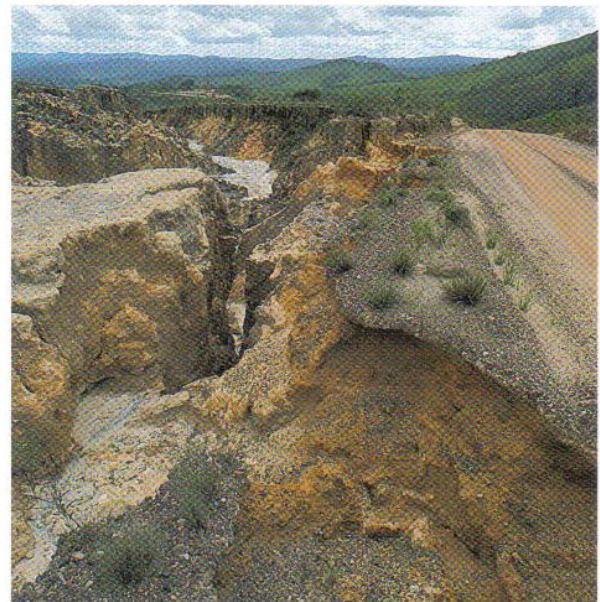
É cada vez mais urgente educar a população acerca do problema do lixo. Mais cedo ou mais tarde o poder público e a população terão de conjugar esforços para resolvê-lo, não só por meios tecnológicos de reciclagem, mas também pela intensificação de ações educativas e de campanhas de conscientização, para estimular as pessoas a desperdiçar menos, produzindo assim menor quantidade de lixo. **(Fig. 18.11)**

▲ **Figura 18.11** • A separação dos diferentes tipos de lixo é fundamental para a reciclagem. **A.** Recipientes para coleta seletiva de lixo em uma escola de São Caetano do Sul, SP. **B.** Usina de reciclagem de lixo em Campinas, SP.

18.3 Interferência humana em ecossistemas naturais

Além de interferir em hábitats naturais produzindo resíduos e poluentes, a humanidade altera o equilíbrio dos ecossistemas, introduzindo espécies exóticas e provocando a extinção de outras em ecossistemas naturais. A interferência em comunidades equilibradas pode colocar em risco toda a intrincada trama de relações que levou centenas ou milhares de anos para se estabelecer.

Desmatamento

A expansão das terras cultivadas e o crescimento das cidades têm causado a destruição de florestas e de outros hábitats naturais. As florestas são derrubadas, ou pior ainda, são queimadas, o que prejudica o solo e causando poluição atmosférica.

Os desmatamentos indiscriminados, além de levar comunidades e espécies à extinção, têm outras graves conseqüências: a erosão e o empobrecimento do solo. A erosão é causada principalmente pelas chuvas e pelo vento. Sem a proteção da cobertura vegetal, o solo pode perder suas camadas férteis e ter seus minerais levados pelas chuvas, tornando-se pobre e acidentado. **(Fig. 18.12)**

▲ **Figura 18.12** • Os desmatamentos indiscriminados têm como conseqüências a erosão e o empobrecimento do solo (Ouro Branco, MG, 1992).

Introdução de espécies exóticas

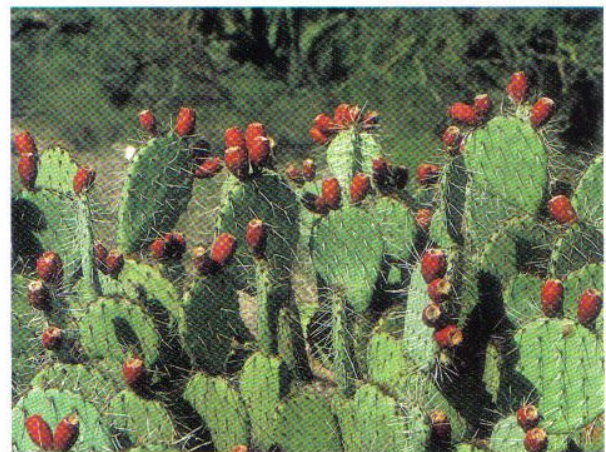
Problemas causados pelo aguapé

O aguapé (*Eichhornia crassipes*) é uma planta aquática originária da América do Sul, introduzida em diversas regiões do mundo como planta ornamental, proliferando, muitas vezes de forma incontrolada. Nos Estados Unidos, por exemplo, o rio Mississípi foi invadido por aguapés, causando prejuízos à navegação. Essa planta também se espalhou pela Indonésia, pelas Filipinas, pela Austrália, além de diversas ilhas do Pacífico, Indochina, Índia e Ceilão. Muitos recursos têm sido gastos na tentativa de eliminar, ou pelo menos controlar, a expansão do aguapé em diversas regiões do mundo. **(Fig. 18.13)**

▲ **Figura 18.13** • Plantas de aguapé da espécie *Eichhornia crassipes* nas proximidades de Cuiabá, MT.

O figo-da-índia na Austrália

Em 1839 foi introduzido, na Austrália, um único exemplar da planta cactácea *Opuntia inermis*, popularmente conhecida como figo-da-índia. Essa espécie é originária da América do Sul e não existia anteriormente no continente australiano. O figo-da-índia adaptou-se tão bem às condições da Austrália que, no final do século XIX, os descendentes da primeira planta já cobriam cerca de quatro milhões de hectares da superfície do país. Em 1920, o figo-da-índia ocupava quase 25 milhões de hectares, e sua tendência era aumentar a área ocupada em cerca de 4 milhões de hectares por ano. Terras utilizáveis para criação de gado foram cobertas por essa planta, tornando-se inúteis para a pecuária.

Os australianos fizeram várias tentativas para controlar o figo-da-índia, com pouco resultado. Finalmente, em 1925, surgiu a idéia de introduzir na Austrália a pequena mariposa *Cactoblastis cactorum*, cujas larvas se alimentam daquela planta. O resultado foi fulminante: a população de figo-da-índia foi praticamente eliminada, tão rapidamente quanto havia proliferado. **(Fig. 18.14)**

▲ **Figura 18.14** • A planta da família das cactáceas *Opuntia inermis*, popularmente conhecida por figo-da-índia, é originária da América do Sul; ao ser introduzida na Austrália, tornou-se uma praga.

O coelho na Austrália

O coelho europeu, *Oryctolagus cuniculus*, é originário das regiões mediterrâneas. Em 1859, 24 casais dessa espécie foram levados à Austrália, onde encontraram um ambiente extremamente favorável, com comida farta e praticamente nenhum parasita ou predador que regulasse o tamanho da população. Apenas 18 anos após sua introdução, em 1877, a população de coelhos havia atingido um tamanho tão grande que os australianos promoveram uma enorme caçada. Naquela ocasião foram

abatidos cerca de 20 milhões de animais, mas, mesmo assim, não se conseguiu controlar o crescimento dessa população. Os coelhos devastaram as pastagens, deixando as ovelhas, principal riqueza da região, praticamente sem alimento e causando prejuízos incalculáveis à economia do país. Os australianos construíram uma gigantesca cerca que divide grande parte do continente e cujo objetivo é impedir que os coelhos invadam outras regiões. **(Fig. 18.15)**

▲ **Figura 18.15** • Fotografia de coelhos na Austrália, ao lado da cerca que divide grande parte do país para impedir a dispersão desses animais para outras regiões.

Em 1950 foi deliberadamente introduzido na Austrália um vírus nativo da América do Sul causador de uma doença de coelhos, a **mixomatose**. O vírus, transmitido por mosquitos sugadores de sangue, não representava perigo para as espécies nativas, visto que atacava somente coelhos e umas poucas espécies de lebres.

Como a população de coelhos era enorme, o vírus disseminou-se rapidamente, causando a morte de 99% dos animais existentes. Alguns coelhos sobreviventes, no entanto, mostraram-se resistentes ao vírus, e essa condição passou a ser transmitida à descendência. Por outro lado, o vírus originalmente introduzido era tão fatal que os coelhos infectados morriam rapidamente, antes de transmitirem a doença. Com isso, os vírus mais violentos eram eliminados junto com seus hospedeiros, antes de se espalhar, enquanto linhagens menos letais, causadoras de uma forma mais branda da doença, passaram a ser beneficiadas pela seleção natural. Assim, ao mesmo tempo em que coelhos com maior resistência ao vírus foram selecionados, também ocorreu seleção de vírus menos letais e a população de coelhos voltou a crescer descontroladamente. O problema continua até hoje e causa enormes prejuízos financeiros ao país.

Os escaravelhos na Austrália

Em 1788, quando o gado bovino foi introduzido na Austrália, parte das pastagens tornou-se inutilizável devido ao acúmulo de fezes bovinas não-degradadas. As placas de esterco endureciam, permanecendo longo tempo no pasto sem se degradar, matando o capim embaixo delas. Por que isso não ocorria em outros países?

O problema foi resolvido quando se descobriu que na Austrália não havia escaravelhos (insetos coleópteros) como os da espécie *Garreta nitens*. Os escaravelhos machos dessa espécie transformam as grandes massas de esterco do gado em pequenas bolas, que levam para buracos escavados no solo, e as fêmeas colocam ovos nas bolas de esterco, o qual serve de alimento para as larvas desse inseto. Os criadores de gado australianos importaram escaravelhos de outros países, e conseguiram recuperar as pastagens. Alguns anos depois, o gado passou a viver na Austrália como em qualquer outra região do mundo, graças à presença do escaravelho.

Extinção de espécies

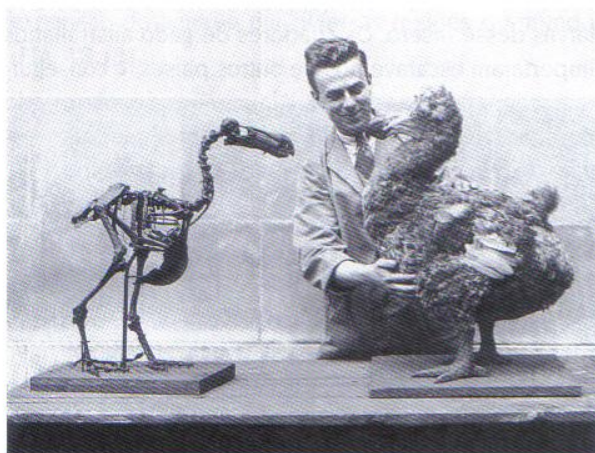
A extinção de espécies pode causar sérios distúrbios ao equilíbrio de um ecossistema. Há alguns anos, grande número de espécies está sob ameaça de extinção em conseqüência da expansão da população humana.

A destruição dos hábitats de plantas e animais e a caça e a pesca excessivas ("predatórias", como são chamadas) têm levado inúmeras espécies à extinção. O tamanho mínimo que uma população pode atingir sem se extinguir varia de espécie para espécie, dependendo da capacidade reprodutiva, da vulnerabilidade às influências do meio e à duração de seu ciclo vital, entre outros aspectos. Das espécies caçadas atualmente, muitas estão ameaçadas de extinção, uma vez que suas populações estão atingindo o limite mínimo de tamanho necessário à sua manutenção. Mesmo que a caça e a pesca de certas espécies sejam interrompidas, muitas delas já perderam a capacidade de se recuperar e fatalmente se extinguirão.

A extinção do dodô

Um dos exemplos de total extinção de espécies é o da ave dodô, que vivia nas Ilhas Mascarenhas, no Oceano Índico. O verdadeiro dodô, ***Raphus cucullatus***, habitava a Ilha Maurício e se extinguiu por volta de 1680. Outras duas espécies aparentadas a ele extinguiram-se entre 1750 e 1800, nas ilhas Reunión e Rodríguez. O dodô era uma ave grande, do tamanho aproximado de um peru, e com uma cabeça grande, dotada de bico recurvado.

Sua extinção deveu-se à caça movida pelos marinheiros holandeses, que utilizavam sua carne como alimento, e à introdução de porcos e macacos na ilha. Os porcos atacavam os ninhos das aves, construídos no chão, comendo os filhotes, e os macacos consumiam seus ovos.

Embora o desaparecimento dos dodôs tenha causado pouco transtorno ecológico, a extinção de uma espécie não deixa de se constituir em, pelo menos, uma agressão às gerações futuras. Fomos privados do nosso direito de conhecer os dodôs, assim como as gerações que nos sucederão serão privadas, talvez, de conhecerem animais como rinocerontes, elefantes e baleias, entre outros. **(Fig. 18.16)**

▲ **Figura 18.16** • Esqueleto de um dodô junto a um modelo reconstruído dessa ave extinta.

Extinção da ararinha-azul

Um dos casos mais recentes de extinção no Brasil, acompanhado em detalhe pelos pesquisadores, foi o da ararinha-azul, *Cyanopsitta spixii*. Trata-se de uma ave de cor azul-clara que vivia no extremo norte da Bahia, na caatinga ao sul do Rio São Francisco. Relatos de moradores locais indicam que, pelo menos desde o início do século, a espécie era rara na natureza, existindo no local cerca de 30 casais. A partir da década de 1970, justamente devido à sua raridade, exemplares foram capturados e comercializados ilegalmente. A partir de outubro de 2000, o último exemplar selvagem conhecido dessa espécie, que habitava a região de Curaçá, no sertão da Bahia, e vinha sendo acompanhado pelos pesquisadores, deixou de ser visto. O Ibama declarou a espécie oficialmente extinta em julho de 2002. Nessa época, existiam apenas 60 exemplares em cativeiro no mundo; o Brasil detinha a propriedade de apenas oito e os demais estavam em poder de mantenedores e de colecionadores particulares estrangeiros. **(Fig. 18.17)**

▲ **Figura 18.17** • Ararinhas-azuis em cativeiro. Essa espécie está extinta na natureza.

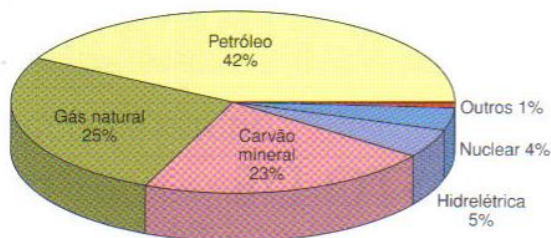
18.4 Caminhos e perspectivas

Fala-se que a espécie humana, por agredir a natureza, está a caminho da autodestruição. Será que existem riscos reais de catástrofes causadas pela poluição ou pelo esgotamento de fontes de energia e de outros importantes recursos naturais?

Jornais e revistas veiculam informações desencontradas. A maioria dos estudiosos acredita que a humanidade se encontra muito perto de provocar danos irreparáveis ao planeta. Alguns, porém, também proclamam que os alertas dos ambientalistas são exagerados e que a humanidade saberá solucionar todos os problemas que criar. Quem terá razão?

Antes de tudo, é preciso ficar claro que a espécie humana não pode sobreviver senão explorando os recursos do ambiente. Temos, necessariamente, de extrair de outros seres vivos recursos para viver; ao comermos plantas e animais, deles extraímos energia e matéria-prima para manter nossa vida. Além disso, temos de combater as espécies que nos causam doenças (bactérias, fungos, vermes, insetos etc.) e também aquelas que competem conosco pelo alimento (parasitas e predadores de nossas lavouras e rebanhos).

Alternativas energéticas

A civilização moderna tem como base um alto consumo de energia. Pense nas indústrias, nos transportes, nos eletrodomésticos e nas telecomunicações, que dependem de processos e de equipamentos em que se utilizam várias formas de energia. Atualmente, a maior parte da energia empregada nas sociedades industrializadas provém de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo. **(Fig. 18.18)**

▲ **Figura 18.18** • O gráfico mostra o percentual dos vários tipos de combustível empregados em um país desenvolvido, no caso, os Estados Unidos.

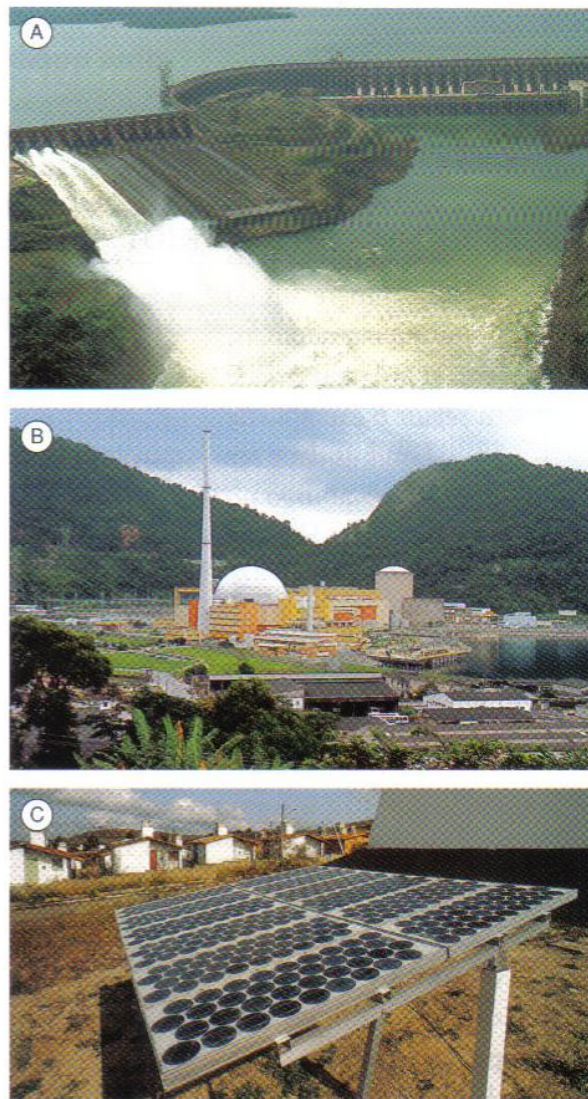
Os combustíveis fósseis são **recursos não-renováveis**, isto é, que se esgotarão em um futuro relativamente próximo; sua duração depende de como forem utilizados e economizados. Enquanto isso, a humanidade precisa pesquisar formas alternativas de produção de energia.

A **energia hidrelétrica** é produzida pela passagem de água por turbinas, que geram energia elétrica. Embora seja uma das formas menos poluentes de obtenção de energia, a produção de energia hidrelétrica não deixa de causar impacto negativo sobre o ambiente, pois é necessário desviar cursos de rios e alagar regiões para construir as usinas hidrelétricas, o que pode provocar alterações no clima e acarretar o desaparecimento de comunidades que habitam a região alagada.

A **energia nuclear** é obtida pelo emprego de substâncias denominadas "combustíveis nucleares", cujos núcleos atômicos são desintegrados no interior dos reatores de fissão nuclear, nas usinas nucleares. Esse tipo de tecnologia para produzir energia tem se mostrado perigoso: diversos acidentes já ocorreram e não se sabe o que fazer com o "lixo radioativo", extremamente perigoso, produzido pelas usinas nucleares. Esses riscos têm levado inúmeros países a deixar de investir nesse tipo de alternativa energética.

A produção de **combustíveis renováveis**, como o álcool etílico (etanol), o biodiesel e o gás natural (metano) constituem alternativas viáveis para suprir parte da demanda energética. O Brasil foi o primeiro país a utilizar em larga escala o etanol, obtido da fermentação da cana-de-açúcar, como combustível de automóveis; atualmente incentiva-se o uso do biodiesel, extraído principalmente do dendê e da mamona, como substituto do diesel obtido do petróleo.

Uma das alternativas energéticas ainda em desenvolvimento é o aproveitamento de **energia solar**, que pode ser transformada em energia elétrica e acumulada, ou mesmo utilizada diretamente para o aquecimento de água. Ainda em fase de estudos no Brasil, mas já amplamente utilizado em outros países como EUA, Alemanha e Dinamarca, seguidos pela Índia e Espanha, está o aproveitamento da **energia eólica** (energia dos ventos), uma promissora perspectiva para substituir fontes de energia que têm impactos negativos sobre o ambiente. **(Fig. 18.19)**

A natureza pode suportar a atividade exploradora da humanidade, desde que não se ultrapassem determinados limites. Teoricamente, nossa espécie poderia viver em harmonia com a natureza, conciliando o uso e a exploração dos recursos com os níveis naturais de oferta. O que se vê, porém, é um aumento vertiginoso dos problemas da humanidade. Muitos ainda não se deram conta da gravidade e da extensão dos danos causados à natureza, mas, dentro de pouco tempo, a proteção e a restauração de ecossistemas naturais deverão ser prioritárias para todos os povos.

▲ **Figura 18.19** • **A.** As usinas hidrelétricas, como a de Itaipu, no estado do Paraná, têm sido alternativas energéticas para países como o Brasil, em que há muitos rios. **B.** Usinas nucleares, como a de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, têm se mostrado perigosas, como atestam os vários acidentes ocorridos em diversas partes do mundo. **C.** A energia solar ainda não é utilizada em larga escala, mas é uma alternativa promissora em médio prazo; na foto, painel de energia solar em Garanhuns, PE.

LEITURA

IMPOSTO DE CONGESTIONAMENTO LIMPA O AR

Poucos carros e maior velocidade contribuem para uma queda significativa em óxidos de nitrogênio, particulados e gás carbônico

Cidades nos EUA, Japão e Europa estão acompanhando os progressos do esquema adotado, mas a próxima cidade a seguir o exemplo de Londres deve ser Edimburgo na Escócia

O imposto de congestionamento de 5 libras esterlinas por dia para trafegar pelo centro de Londres diminuiu as emissões de certos gases de efeito estufa em aproximadamente 20%, em seu primeiro ano de vigência.

Com base no número, na velocidade e no tipo de veículos que trafegam por certos pontos de checagem na cidade, Sean Beevers e David Carslaw do *King's College* de Londres calcularam que os óxidos de nitrogênio e os particulados diminuíram 16%. A diminuição do número de carros e um aumento de 4 km por hora na velocidade média dos veículos foram responsáveis por três quartos desta queda, sendo o restante devido à melhoria da tecnologia de construção dos veículos (tecnologia verde). As emissões de gás carbônico diminuíram 19%. Mesmo um aumento no número de ônibus, cujos motores a diesel estão entre os mais poluidores, não alterou este ganho, em parte porque os ônibus modernos são dotados de filtros que retêm os poluentes particulados.

Cidades nos EUA, Japão e Europa estão acompanhando os progressos do esquema adotado, mas a próxima cidade a seguir o exemplo de Londres deve ser Edimburgo na Escócia, que estará submetendo a proposta de imposto de congestionamento a um referendo no início do próximo ano [2005]. "Edimburgo não conseguirá atingir as metas nacionais de qualidade do ar sem a introdução do imposto de congestionamento, juntamente com uma série de melhorias no transporte público", diz Donald Anderson membro do Conselho da Cidade de Edimburgo.

Com o imposto, os óxidos de nitrogênio e os particulados diminuíram 16%

Mas o imposto de congestionamento pode não ser suficiente na luta contra a poluição, especialmente quando a medida cobre apenas uma pequena parte da cidade – meros 1,3%, no caso de Londres.

Um verão anormalmente quente em 2003, que diminuiu a velocidade de deslocamento das massas de ar e os ventos do leste, trouxe para Londres poluição da Europa, tornando o ar da cidade pior do que ele tinha sido no verão de 2002. "Se alguém fizesse uma comparação ingênua iria concluir que o imposto sobre congestionamento fez com que a poluição aumentasse", diz Beevers cujo trabalho será publicado na revista *Atmospheric Environment*. "Isso seria claramente ilógico."

- **Fonte:** Katharine Davis. *New Scientist*, vol. 184, n. 2475 – 27, nov. 2004, p. 11. (*Tradução e adaptação nossa*)

ATIVIDADES

GUIA DE ESTUDO

18.1 O "impacto" da espécie humana na natureza

1. Que tipos de impactos negativos a população humana tem causado à natureza?

2. Qual seria a saída para a preservação do ambiente terrestre?

18.2 Poluição ambiental

3. Conceitue poluição.

4. Cite alguns tipos de poluição e comente a tragédia ocorrida em Londres em 1952 por efeito da poluição.

5. Do que depende o controle da poluição?

6. Quais são os principais poluentes do ar atmosférico?

7. Que perigos oferece a poluição por monóxido de carbono?

8. Que relação existe entre poluição atmosférica e chuvas ácidas?

9. Qual é a origem das partículas poluidoras em suspensão no ar?

10. Descreva brevemente como ocorre a inversão térmica.

11. Explique o que é efeito estufa natural e cite os principais gases atmosféricos responsáveis por esse fenomêno.

12. Por que os cientistas acreditam que a temperatura do planeta se elevará nas próximas décadas se nenhuma providência for tomada?

13. Cite o que poderia ocorrer de drástico em nosso planeta com a elevação da temperatura global.

14. O que é o Protocolo de Kioto?

15. Por que o ozônio é considerado um poluente atmosférico?

16. Conceitue eutroficação das águas.

17. Estabeleça uma relação entre maré vermelha e poluição das águas.

18. Como se explica o fato de certos poluentes aumentarem em concentração no corpo de animais dos níveis tróficos mais altos?

19. Cite algumas soluções que podem diminuir o impacto poluente do lixo.

20. O que é necessário para que a reciclagem do lixo seja adotada em larga escala no Brasil?

18.3 Interferência humana em ecossistemas naturais

21. Por que a introdução de espécies exóticas e a extinção de espécies prejudica os ecossistemas?

22. De que modo os desmatamentos são prejudiciais aos ecossistemas?

18.4 Caminhos e perspectivas

23. Que tipos de impacto ambiental pode ter a geração de energia hidroelétrica?

24. O que é energia nuclear? Que riscos sua produção oferece?

25. Comente sobre os combustíveis renováveis.

QUESTÕES PARA PENSAR E DISCUTIR

QUESTÕES OBJETIVAS

26. O lançamento no ambiente de substâncias ou agentes físicos perigosos à saúde humana e de outros organismos é chamado de

a) efeito estufa.
b) eutrofícação.
c) inversão térmica.
d) poluição.

27. Que fenômeno é responsável pelo aquecimento da superfície terrestre devido à retenção de calor por certos gases atmosféricos?

a) Buraco de ozônio.
b) Chuva ácida.
c) Efeito estufa.
d) Inversão térmica.

28. Um dos principais poluentes atmosféricos nas metrópoles, que afeta a hemoglobina do sangue e cuja principal fonte emissora são os automóveis, é o

a) dióxido de carbono (CO_2).
b) dióxido de enxofre (SO_2).
c) metano (CH_4).
d) monóxido de carbono (CO).

Utilize as alternativas a seguir para responder às questões de 30 a 35.

a) Chuva ácida.
b) Efeito estufa.
c) Eutrofícação.
d) Inversão térmica.

29. Que fenômeno é provocado por poluentes atmosféricos produzidos na queima de carvão mineral e diesel, que reagem com a água das nuvens originando ácido sulfúrico?

30. Qual é o fenômeno provocado pelo acúmulo de matéria orgânica na água de rios e lagos, causado pelo lançamento de esgotos?

31. Que fenômeno, no inverno, provoca a retenção de poluentes atmosféricos próximo à superfície?

32. Qual fenômeno leva à proliferação de bactérias aeróbicas, que consomem o gás oxigênio (O_2) da água, causando a morte de peixes e outros organismos aquáticos?

33. Qual fenômeno pode causar mudanças climáticas globais e a elevação do nível dos mares?

34. Qual fenômeno é acentuado pelo acúmulo, na atmosfera, de gases como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), capazes de absorver energia e irradiar calor?

35. Qual das atividades humanas mencionadas a seguir mais contribui para o efeito estufa?
a) Construção de usinas hidrelétricas.
b) Construção de usinas nucleares.
c) Liberação de clorofluorcarbonos (CFCs).
d) Queima de combustíveis fósseis.

36. Das alternativas a seguir, apenas uma **não** representa uma conseqüência direta do desmatamento. Qual é ela?
a) Chuva ácida.
b) Diminuição da biodiversidade.
c) Empobrecimento do solo em minerais.
d) Erosão.

37. Um lago, com uma cadeia alimentar constituída de plâncton, plantas aquáticas, caramujos, pequenos peixes e aves aquáticas carnívoras, teve suas águas contaminadas pelo inseticida DDT, que tem a propriedade de se acumular no corpo dos seres vivos. Em qual dos constituintes da cadeia alimentar espera-se encontrar a maior concentração do inseticida?
a) Aves aquáticas
b) Caramujos
c) Peixes
d) Plâncton

QUESTÕES DISCURSIVAS

38. Escreva um texto que correlacione: **sociedade industrial**; **superpopulação**; **aumento do efeito estufa**. Tente desenvolver uma argumentação lógica, que mostre relações de causa e efeito. Por exemplo, sociedade industrializada implica aumento no uso de combustíveis? De que tipo? O que isso tem a ver com o efeito estufa? Por quê? E assim por diante. Procure dados neste livro ou em outras fontes e, com base neles, justifique sua análise.

39. A emissão de poluentes por automóveis e por indústrias é mais ou menos constante ao longo do ano; entretanto, nos grandes centros industriais brasileiros, têm-se verificado níveis alarmantes de poluentes atmosféricos junto ao solo, principalmente nos meses mais frios. Explique a razão disso.

40. Suponha que um lago receba grande volume de esgotos domésticos, constituído basicamente por resíduos orgânicos. Que efeito positivo teria um grande motor de pás que movimentasse a água, causando sua oxigenação? Discuta.

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

QUESTÕES OBJETIVAS

41. (Unifesp) O grande aquecimento global verificado nos últimos 25 anos aponta o homem como o principal responsável pelas mudanças climáticas observadas no planeta atualmente. Sobre esse assunto, é correto afirmar que
a) os principais agentes do aquecimento global são o aumento de CO_2 e de gases contendo enxofre liberados diariamente. A quantidade de vapor d'água atmosférico, que em princípio poderia também influenciar, não tem apresentado grandes alterações a longo prazo, pelas próprias características que possui o ciclo da água no planeta.
b) a destruição da camada de ozônio pelo uso continuado de CFCs (clorofluorcarbonos) é apontada, juntamente com o aumento da liberação de CO_2 por combustíveis fósseis, como um dos principais agentes promotores do aquecimento global.
c) poeira e pequenas partículas em suspensão eliminadas com a poluição configuram-se, juntamente com o vapor d'água misturado ao enxofre, como os principais responsáveis pelo efeito estufa desregulado, que aumenta o aquecimento no planeta.
d) a contenção do uso de combustíveis fósseis e o controle da liberação de gás metano por material em decomposição e pelos lixões das áreas urbanas são apontados como fatores importantes para deter o aumento do aquecimento global.
e) o excesso de CO_2 liberado e o aquecimento global por ele provocado inibem, a longo prazo, a expansão das florestas. Além disso, o aumento das queimadas libera mais CO_2 e deixa vastas áreas descobertas, piorando o efeito estufa desregulado.

42. (Unirio-RJ) "Somos o maior poluidor do mundo, mas, se for preciso, poluiremos ainda mais, para evitar uma recessão na economia ..."

(Terrorista Ambiental. "Jornal do Brasil", Rio de Janeiro, 2002.)

Com esta declaração, o autor demonstrou a intenção em não ratificar o Protocolo de Kioto, que propõe a redução da emissão dos gases poluentes causadores de mudanças no planeta tais como o aquecimento global, alterações no regime das chuvas e perda de biodiversidade.
O principal gás causador dessas alterações ambientais é o
a) clorofluorcarbono.
b) metano.
c) monóxido de carbono.
d) ozônio.
e) dióxido de carbono.

43. (FGV-SP) O fenômeno a que chamam "inversão térmica" consiste na

a) mudança brusca de temperatura causando as tempestades de verão freqüentes em S. Paulo.
b) mudança brusca de temperatura na Amazônia em decorrência de massas polares que ingressam pela bacia do Paraná, passando pelo Centro-Oeste e alcançando o Norte do Brasil.
c) interposição de camadas quentes de ar entre camadas frias localizadas a uma certa altitude impedindo a dispersão de poluentes atmosféricos para as camadas superiores.
d) mudança de temperatura do mar pela presença de enormes quantidades de poluentes biodegradáveis cuja digestão é essencialmente exotérmica.
e) mudança lenta e gradual da temperatura das camadas médias da atmosfera ocasionada por reações endotérmicas entre poluentes industriais.

44. (Fatec-SP) "Na cidade de São Paulo, nos meses de inverno, há um aumento muito grande de poluentes do ar. Normalmente, as camadas inferiores do ar são mais quentes do que as superiores; o ar quente, menos denso, sobe, carregando os poluentes e é substituído por ar frio. Nos meses de junho, julho e agosto, geralmente as camadas inferiores ficam muito frias e densas; logo, o ar não sobe com facilidade e a concentração de poluentes cresce."

O texto, ao estabelecer um paralelo entre a densidade do ar e temperatura, pretende mostrar o fenômeno

a) do aumento da população, determinando a poluição.
b) da poluição química por produtos não biodegradáveis.
c) das chuvas ácidas.
d) do efeito estufa.
e) da inversão térmica.

45. (Ufal) O dióxido de enxofre (SO_2), produto tóxico liberado na atmosfera a partir da queima industrial de combustíveis, está relacionado diretamente com

a) destruição da camada de ozônio.
b) a formação da chuva ácida.
c) a inversão térmica.
d) o efeito estufa.
e) a eutrofização.

46. (Ufla-MG) O teor de gás carbônico (CO_2) atmosférico vem aumentando: em 1850 era de 275 ppm (partes por milhão), em 1958 era de 315 ppm e em 1982 era de 340 ppm. Estima-se que em 2050 sejam atingidos teores entre 550 ppm e 650 ppm. Qual alternativa aponta, respectivamente, a principal causa de aumento de CO_2 atmosférico e uma possível conseqüência desse fenômeno?

a) Queimadas na Amazônia; lixiviação e empobrecimento dos solos.
b) Queima de combustíveis fósseis; aumento da temperatura global.
c) Desflorestamento; diminuição da fertilidade do solo.
d) Aumento da área de terras cultivadas; aumento nas taxas de fotossíntese.
e) Destruição da camada de ozônio; aumento da taxa de mutação gênica.

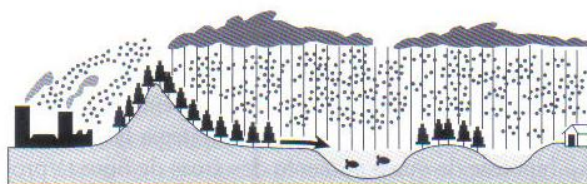
47. (PUC-RS) Em outubro passado, cientistas revelaram que o aquecimento médio global cresceu num índice superior às expectativas. No dia 13 de dezembro de 2000, os jornais publicaram que o Rio Grande do Sul bateu seu recorde de consumo de energia devido às altas temperaturas registradas.

O aumento da temperatura mundial, referido no texto, somente NÃO poderia ser explicado:

a) pelo efeito estufa.
b) pelo aumento na emissão de CO_2.
c) pelo aumento das reservas de petróleo.
d) pelas queimadas das áreas vegetais.
e) pelos buracos na camada de ozônio.

48. (UEL-PR) Os especialistas têm observado que a temperatura média anual está aumentando. Uma das causas desse aumento é o "efeito estufa", cuja ocorrência se deve

a) ao aumento da concentração de monóxido de carbono na atmosfera.
b) ao aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera.
c) ao aumento da concentração de nitrogênio na atmosfera.
d) à diminuição da concentração de oxigênio na atmosfera.
e) à diminuição da concentração da camada de ozônio na atmosfera.

49. (Enem-MEC) Uma região industrial lança ao ar gases como o dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, causadores da chuva ácida. A figura mostra a dispersão desses gases poluentes.

Considerando o ciclo da água e a dispersão dos gases, analise as seguintes possibilidades:

I. As águas de escoamento superficial e de precipitação que atingem o manancial poderiam causar aumento de acidez da água do manancial e provocar a morte de peixes.
II. A precipitação na região rural poderia causar aumento de acidez do solo e exigir procedimentos corretivos, como a calagem.
III. A precipitação na região rural, embora ácida, não afetaria o ecossistema, pois a transpiração dos vegetais neutralizaria o excesso de ácido.

Dessas possibilidades
a) pode ocorrer apenas a I.
b) pode ocorrer apenas a II.
c) podem ocorrer tanto a I quanto a II.
d) podem ocorrer tanto a I quanto a III.
e) podem ocorrer tanto a II quanto a III.

50. (PUC-RJ) A maior parte da energia usada hoje no planeta é proveniente da queima de combustíveis fósseis. O Protocolo de Kyoto, acordo internacional que inclui a redução da emissão de CO_2 e de outros gases, demonstra a grande preocupação atual com o meio ambiente. O excesso de queima de combustíveis fósseis pode ter como conseqüências:
a) maior produção de chuvas ácidas e aumento da camada de ozônio.
b) aumento do efeito estufa e dos níveis dos oceanos.
c) maior resfriamento global e aumento dos níveis dos oceanos.
d) destruição da camada de ozônio e diminuição do efeito estufa.
e) maior resfriamento global e aumento da incidência de câncer de pele.

51. (Fuvest-SP) Um importante poluente atmosférico das grandes cidades, emitido principalmente por automóveis, tem a propriedade de se combinar com a hemoglobina do sangue, inutilizando-a para o transporte de gás oxigênio. Esse poluente é o
a) dióxido de carbono.
b) dióxido de enxofre.
c) metano.
d) monóxido de carbono.
e) ozônio.

52. (Fuvest-SP) A recente descoberta de uma vasta região de mar descongelado no Pólo Norte é um exemplo dos efeitos do aquecimento global pelo qual passa o planeta. Alarmados com a situação, alguns países industrializados elaboraram uma carta de intenções em que se comprometem a promover amplos reflorestamentos, como uma estratégia para reduzir o efeito estufa e conter o aquecimento global. Tal estratégia baseia-se na hipótese de que o aumento das áreas de floresta promoverá maior:
a) liberação de gás oxigênio, com aumento da camada de ozônio e redução da radiação ultravioleta.
b) retenção do carbono na matéria orgânica das árvores, com diminuição do gás carbônico atmosférico responsável pelo efeito estufa.
c) disponibilidade de combustíveis renováveis e, conseqüentemente, menor queima de combustíveis fósseis, que liberam CFC (clorofluorcarbono).
d) absorção de CFC, gás responsável pela destruição da camada de ozônio.
e) sombreamento do solo, com resfriamento da superfície terrestre.

53. (Enem-MEC) No ciclo da água, usado para produzir eletricidade, a água de lagos e oceanos, irradiada pelo Sol, evapora-se dando origem a nuvens e se precipita como chuva. É então represada, corre de alto a baixo e move turbinas de uma usina, acionando geradores. A eletricidade produzida é transmitida através de cabos e fios e é utilizada em motores e outros aparelhos elétricos. Assim, para que o ciclo seja aproveitado na geração de energia elétrica, constrói-se uma barragem para represar a água.
Entre os possíveis impactos ambientais causados por essa construção, devem ser destacados
a) aumento do nível dos oceanos e chuva ácida.
b) chuva ácida e efeito estufa.
c) alagamentos e intensificação do efeito estufa.
d) alagamentos e desequilíbrio da fauna e da flora.
e) alteração do curso natural dos rios e poluição atmosférica.

54. (Fatec-SP) "Em 1923 introduziu-se na gasolina o composto tetra-etila de chumbo para melhorar o desempenho dos automóveis. Essa evolução tecnológica não levou em consideração o chumbo, que não é biodegradável. Alguns anos depois, analisaram-se alguns vegetais (couves e alfaces) cultivados à beira das estradas e demonstrou-se que continham vinte vezes mais chumbo que os das áreas agrícolas mais distantes."

(*Texto modificado e adaptado da* Enciclopédia de Ecologia EDUSP - 1973, *vários autores*)

Após a análise do texto anterior, assinale a alternativa correta.
a) O chumbo estará mais concentrado nos herbívoros que nos carnívoros da região.
b) O chumbo é degradado pelas bactérias e fungos e, caso outras novas tecnologias venham a substituí-lo, ele desaparecerá rapidamente do ecossistema.
c) O chumbo, se ingerido por um herbívoro ou por um carnívoro, será digerido e degradado, não comprometendo mais o ecossistema.
d) O chumbo estará mais concentrado nos carnívoros que nos herbívoros da região.
e) O chumbo não é absorvido pelos vegetais; logo, basta lavá-los em água corrente para nos livrarmos dele.

55. (PUC-PR) Em vários pontos do Brasil, as lagoas situadas próximas às grandes cidades, têm sofrido cruelmente com o despejo de esgotos a céu aberto. Isto acarreta uma mortandade de toneladas e toneladas de peixes e microrganismos aquáticos, o que tem chamado a atenção dos ambientalistas e biólogos para o estado crítico de desequilíbrio ambiental em que se encontram esses ecossistemas.
Assinale a alternativa que melhor explica a mortalidade desses organismos.
a) Nas lagoas eutrofizadas, há uma proliferação excessiva das algas, gerando uma grande competição pela luz e pelos nutrientes.

b) O excesso de nutrientes da água proveniente dos esgotos e fertilizantes favorece a proliferação de bactérias aeróbicas, provocando uma baixa concentração de oxigênio dissolvido na água e a morte desses seres aeróbicos.
c) A poluição da água com detergentes biodegradáveis pode perturbar o ciclo do carbono, com conseqüente mortandade dos peixes.
d) Quando lançamos uma quantidade excessiva de substâncias orgânicas na água, há o aumento na quantidade de bactérias anaeróbicas e o conseqüente aumento na quantidade de oxigênio.
e) Os peixes, ao se alimentarem da matéria orgânica lançada na lagoa junto ao esgoto, morrem por contaminação, provocada pelo crescimento de bactérias anaeróbicas.

56. (Enem-MEC) A corvina é um peixe carnívoro que se alimenta de crustáceos, moluscos e pequenos peixes que vivem no fundo do mar. É bastante utilizada na alimentação humana, sendo encontrada em toda a costa brasileira, embora seja mais abundante no sul do País. A concentração média anual de mercúrio no tecido muscular de corvinas capturadas em quatro áreas, bem como as características destas áreas estão descritas adiante:

Baía de Guanabara (RJ) - 193,6

Área de intensa atividade portuária, que recebe esgotos domésticos não tratados e rejeitos industriais de cerca de 6.000 fontes.

Baía de Ilha Grande (RJ) - 153,8

Recebe rejeitos de parque industrial ainda em fase de crescimento e é uma das principais fontes de pescado do estado.

Baía de Sepetiba (RJ) - 124,0

Área sujeita a eficientes efeitos de maré e com baixa atividade pesqueira, sem fontes industriais de contaminação por mercúrio.

Lagoa da Conceição (SC) - 90,6*

Importante fonte de pescado no litoral catarinense, na qual praticamente inexiste contaminação industrial por mercúrio.

* Concentração natural de mercúrio, característica de local não contaminado.

(*KEHRIG. H. A. & MALM, O. Mercúrio: uma avaliação na costa brasileira.* Ciência Hoje, *outubro, 1997.*)

Segundo a legislação brasileira, o limite máximo permitido para as concentrações de mercúrio total é de 500 nanogramas por grama de peso úmido. Ainda levando em conta os dados fornecidos e o tipo de circulação do mercúrio ao longo da cadeia alimentar, pode-se considerar que a ingestão, pelo ser humano, de corvinas capturadas nessas regiões,

a) não compromete a sua saúde, uma vez que a concentração de mercúrio é sempre menor que o limite máximo permitido pela legislação brasileira.
b) não compromete a sua saúde, uma vez que a concentração de poluentes diminui a cada novo consumidor que se acrescenta à cadeia alimentar.
c) não compromete a sua saúde, pois a concentração de poluentes aumenta a cada novo consumidor que se acrescentar à cadeia alimentar.
d) deve ser evitada, apenas quando entre as corvinas e eles se interponham outros consumidores, como, por exemplo, peixes de maior porte.
e) deve ser evitada sempre, pois a concentração de mercúrio das corvinas ingeridas se soma à já armazenada no organismo humano.

57. (Enem-MEC) Comparando as características das quatro áreas de coleta às respectivas concentrações médias anuais de mercúrio nas corvinas capturadas, pode-se considerar que, à primeira vista, os resultados

a) correspondem ao esperado, uma vez que o nível de contaminação é proporcional ao aumento da atividade industrial e do volume de esgotos domésticos.
b) não correspondem ao esperado, especialmente no caso da Lagoa da Conceição, que não apresenta contaminação industrial por mercúrio.
c) não correspondem ao esperado no caso da Baía da Ilha Grande e da Lagoa da Conceição, áreas nas quais não há fontes industriais de contaminação por mercúrio.
d) correspondem ao esperado, ou seja, corvinas de regiões menos poluídas apresentam as maiores concentrações de mercúrio.
e) correspondem ao esperado, exceção aos resultados da Baía de Sepetiba, o que exige novas investigações sobre o papel das marés no transporte de mercúrio.

58. (Enem-MEC) Artemia é um camarão primitivo que vive em águas salgadas, sendo considerado um fóssil vivo. Surpreendentemente, possui uma propriedade semelhante à dos vegetais que é a diapausa, isto é, a capacidade de manter ovos dormentes (embriões latentes) por muito tempo. Fatores climáticos ou alterações ambientais podem subitamente ativar a eclosão dos ovos; assim como, nos vegetais, tais alterações induzem a germinação de sementes.

Vários estudos têm sido realizados com artemias, pois estes animais apresentam características que sugerem um potencial biológico: possuem alto teor de proteína e são capazes de se alimentar de partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão. Tais características podem servir de parâmetro para uma avaliação do potencial econômico e ecológico da artemia.

Em um estudo foram consideradas as seguintes possibilidades:

I. A variação da população de artemia pode ser usada como um indicador de poluição aquática.
II. A artemia pode ser utilizada como um agente de descontaminação ambiental, particularmente em ambientes aquáticos.

III. A eclosão dos ovos é um indicador de poluição química.

IV. Os camarões podem ser utilizados como fonte alternativa de alimentos de alto teor nutritivo.

É correto apenas o que se afirma em

a) I e II.
b) II e III.
c) I, II e IV.
d) II, III e IV.
e) I, II, III e IV.

59. (UFRS) Em janeiro de 2000 a Baía da Guanabara experimentou um dos maiores derramamentos de óleo já registrados no Brasil. Sobre este tipo de impacto ambiental é INCORRETO afirmar que

a) o derramamento de óleo em áreas de manguezais afeta a reprodução de um grande número de animais marinhos.
b) as aves aquáticas morrem por envenenamento e hipotermia causados pelo óleo na água.
c) a camada viscosa do óleo causa a morte dos organismos na superfície d'água por asfixia ou imobilização.
d) a gravidade deste problema depende das condições climáticas, tais como direção dos ventos, chuva e níveis de maré.
e) ocorre um aumento na densidade de coliformes fecais nas áreas litorâneas afetadas.

60. (Fatec-SP) "Os dejetos humanos lançados nos rios, lagos e mares causam um aumento na quantidade de nutrientes disponíveis no ambiente. Esse fenômeno denominado ___A___ permite grande proliferação de ___B___ que consomem todo ___C___ existente na água causando a morte da maioria das formas de vida daqueles ambientes."

Assinale a alternativa contendo os termos que substituem corretamente A, B e C, na frase.

a) A - eutroficação; B - bactérias aeróbicas; C - oxigênio.
b) A - eutroficação; B - bactérias aeróbicas; C - nitrogênio.
c) A - dispersão; B - bactérias aeróbicas; C - oxigênio.
d) A - dispersão; B - algas; C - oxigênio.
e) A - inversão; B - algas; C - nitrogênio.

61. (UFRN) "E toda a água do Nilo se transformou em sangue. Os peixes do Nilo morreram, e o rio exalou um olor tão pestilento que os egípcios já não podiam beber de suas águas. Então houve sangue em todo o território do Egito", assim diz a Bíblia (Êxodo, 7:2-21).

Esse texto é, provavelmente, a primeira referência escrita sobre um fenômeno que vem constituindo um problema cada vez mais freqüente, relacionado à

a) contaminação das águas nas zonas costeiras, propiciando multiplicação excessiva de dinoflagelados, o que pode causar perdas econômicas, pela morte maciça de peixes.
b) formação de manchas de cores variadas, causada por uma diversidade de organismos marinhos, devido à falta de oxigênio.
c) circulação deficiente de nitratos e fosfatos essenciais aos peixes, o que provoca a morte de grande número deles, a ponto de formar uma mancha de sangue na água.
d) eutrofização das águas, devido a detritos orgânicos, ocasionando um fenômeno conhecido como "maré planctônica", decorrente do envenenamento de bivalves.

62. (PUC-SP) Em 1953, foi evidenciada, no Japão, uma doença denominada "Mal de Minamata", em que as pessoas afetadas apresentavam distúrbios de visão, audição e coordenação.

Resíduos com mercúrio foram despejados nas águas da baía de Minamata. O mercúrio foi absorvido pelo plâncton que servia de alimento para moluscos e para certos peixes. Por sua vez, os moluscos eram predados por outros grupos de peixes e os peixes representavam a dieta básica das pessoas da região. Sabendo-se que o mercúrio tem efeito cumulativo, espera-se encontrar

a) maior concentração dessa substância no homem e menor concentração no plâncton.
b) maior concentração dessa substância no plâncton e menor concentração no homem.
c) maior concentração dessa substância no plâncton e menor concentração nos peixes e nos moluscos.
d) a mesma concentração dessa substância no plâncton, nos moluscos e nos peixes e uma maior concentração no homem.
e) a mesma concentração dessa substância em todos os elos da teia alimentar descrita.

63. (PUC-PR) A maior parte dos rios que deságuam na Baía de Guanabara apresenta elevada carga de poluição, em função da grande densidade populacional existente na sua bacia contribuinte. No entanto, a carga de poluição pode variar, já que esta depende da proporção existente entre a quantidade de poluentes e a vazão do rio que a recebe. A diferença na qualidade de água do rio São João de Meriti (extremamente poluído) e do rio Guapimirim (pouco poluído) — ambos desaguando na Baía de Guanabara — ilustra esta questão. Neste sentido, considerando-se:

I. a vazão do rio,
II. a quantidade de poluentes que este recebe,
III. a poluição do rio,

constata-se que

a) se I aumenta e II é constante, III tende a diminuir.
b) se II reduz e I aumenta, III tende a aumentar.
c) se I diminui e II é constante, III tende a diminuir.
d) se I e II aumentam, III tende a diminuir.
e) se I e II diminuem, III tende a aumentar.

64. (UFF-RJ) Dos 57,8 mil litros de água tratada que a Cedae produz por segundo, 42 mil vêm do Rio Guandu. Se ninguém fizer nada para alterar o ritmo da polui-

ção no Guandu, teremos no futuro um rio morto, de água impossível de ser tratada para o consumo, como o Tietê, alerta o diretor de Produção e Tratamento da Cedae, Flávio Guedes. A contaminação do Rio Paraíba do Sul, por sua vez, está acima dos padrões para manganês, cádmio, coliformes e fosfato.

Adaptado do Jornal do Brasil, *29 de julho de 2001.*

Com relação à contaminação da água dos rios, pode-se afirmar que

a) a presença de coliformes fecais reflete a contaminação com esgoto sanitário, o que pode causar doenças como hepatite, amebíase e cólera.
b) a eliminação do lançamento de resíduos industriais impede a presença de coliformes fecais.
c) a difteria, principal causa da mortalidade infantil em nosso país, é transmitida por agentes bacterianos presentes na água contaminada.
d) a contaminação biológica e industrial da água pode ser eliminada por fervura e cloração.
e) a purificação total da água é garantida por sua evaporação e posterior precipitação na forma de chuva, ainda que a atmosfera esteja poluída.

QUESTÕES DISCURSIVAS

65. (UFRJ) Estudos recentes sugerem que o reflorestamento e o plantio de árvores em áreas sem vegetação podem contribuir para minimizar o aquecimento global. A redução do aquecimento global ocorreria em função da diminuição do efeito estufa.
Explique por que o aumento das áreas florestadas pode contribuir para reduzir efetivamente o efeito estufa.

66. (UFC-CE) "A idéia de que é inevitável conter as emissões de gás carbônico na atmosfera se concretizou durante a conferência da ONU sobre o meio ambiente em 1992, no Rio de Janeiro [...] Para não ter de diminuir o ritmo de sua produção industrial ou investir em tecnologias limpas e muito caras, algumas empresas estão preferindo compensar o que despejam na atmosfera plantando árvores em áreas desmatadas".

(Revista Veja, *19/4/2000)*

Sobre esse tema, responda:

a) Qual a principal conseqüência do acúmulo de CO_2 na atmosfera? Justifique sua resposta.
b) Em que se baseia a idéia do plantio de árvores para compensar as emissões de CO_2?

67. (Vunesp) O homem moderno tem provocado freqüentes desequilíbrios na natureza. A presença de poluentes na atmosfera, na água e no solo tem gerado diferentes tipos de poluição com danos à saúde dos seres vivos e, em especial, à do homem.
Entre estes agentes poluidores estão os metais pesados, tais como cobre, chumbo e mercúrio e, entre os óxidos de carbono, o mais perigoso, que é o monóxido de carbono (CO).

a) De que forma o monóxido de carbono poderá ser prejudicial à saúde humana quando inspirado pelo homem?
b) Como os metais pesados poderão prejudicar o meio ambiente?

68. (UFRJ) Os coliformes fecais são utilizados como indicadores da qualidade da água. Para isso, mede-se o número aproximado de coliformes por unidade de volume. Se o número de coliformes por unidade de volume encontra-se acima de um determinado limite, a água é considerada imprópria para o consumo ou para o banho.
Explique por que a quantidade de coliformes pode ser utilizada como indicador da qualidade da água.

69. (Unicamp-SP) Os recursos hídricos estão sendo cada vez mais contaminados por esgoto doméstico, que traz consigo grande número de bactérias. Apesar de parte delas não serem patogênicas, muitas causam problemas de saúde ao homem. Levando em conta que as bactérias decompõem a matéria orgânica por processo aeróbico ou anaeróbico e que a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e o índice de coliformes fecais são utilizados como indicativos da poluição da água, resolva as questões a seguir:

a) Compare águas poluídas e não poluídas quanto a: DBO, índice de coliformes fecais, teor de oxigênio dissolvido e ocorrência de processos aeróbicos e anaeróbicos.
b) Os coliformes fecais são bactérias anaeróbicas facultativas. Metabolicamente, o que é um organismo anaeróbico facultativo?
c) Cite uma doença bacteriana adquirida pela ingestão de água contaminada e dê o nome de seu agente causador.

BIBLIOGRAFIA

CAMPBELL, Neil A., REECE, Jane B. & MITCHELL, Lawrence G. *Biology*. 5. ed. Menlo Park, California: The Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., 1999.

CARLSON, Elof Axel. *The gene: a critical history*. Filadélfia: W. B. Saunders Co., 1966.

DAJOZ, Roger. *Ecologia geral*. Trad. Francisco M. Guimarães. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 1978.

DARWIN, Charles. *A origem das espécies*. Trad. Eugênio Amado. Belo Horizonte/São Paulo: Itatiaia/EDUSP, 1985.

DAVIS, Bernard D. *The genetic revolution*. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1991.

DAWKINS, Richard. *A escalada do Monte Improvável: uma defesa da teoria da evolução*. Trad. Suzana Sturlini Couto. São Paulo: Cia. das Letras, 1998.

DOBZHANSKY, Theodosius. *Genética do processo evolutivo*. Trad. Celso Abbade Mourão. São Paulo: Polígono/EDUSP, 1973.

DOLBECCO, Renato & CHIABERGE, Riccardo. *Engenheiros da vida*. Trad. Maria Helena V. Picciochi. Lisboa: Editorial Presença, 1990.

DORST, Jean. *Antes que a natureza morra*. Trad. Rita Buongermino. São Paulo: Edgard Blücher/EDUSP, 1973.

EDIÇÃO ESPECIAL. Novo olhar sobre a evolução humana. *Scientific American Brasil*, n. 2, 2003.

EHRLICH, Anne H. The human population: size and dynamics. *American Zoologist*, v. 25, p. 395-406, 1985.

EHRLICH, Paul R. *The machinery of nature*. New York: Simon & Schuster, 1987.

EHRLICH, Paul & EHRLICH, Anne H. *População, recursos e ambiente*. Trad. José G. Tundisi. São Paulo: Polígono/EDUSP, 1974.

ENERGY FLOW THROUGH ECOSYSTEMS (units 2 and 3). *Producers and consumers*. The Open University, Third Level Course. London: The Open University, 1974.

ENERGY FLOW THROUGH ECOSYSTEMS (units 4 and 5). *Decomposers: whole ecossystems*. The Open University, Third Level Course. London: The Open University, 1974.

FUTUYAMA, D. J. *Biologia evolutiva*. Trad. Mario de Vivo e outros. 2. ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992.

GAMUN, Linda & VINES, Gail. *The evolution of life*. Oxford: Oxford University Press, 1991.

GOULD, Stephen Jay. *Vida maravilhosa*. Trad. Paulo César de Oliveira. São Paulo: Cia. das Letras, 1990.

__________. *Viva o brontossauro!* Trad. Carlos Afonso Malferrari. São Paulo: Cia das Letras, 1992.

GRANT, Peter R. Natural selection and Darwin's finches. *Scientific American*, v. 265. p. 60-65, 1991.

GRIFFITHS, Anthony J. F., MILLER, Jeffrey H. SUZUKI, David T. LEWONTIN, Richard C. & GELBART, William M. *An introduction to genetic analysis*. 7. ed. New York: W. H. Freeman, 2000.

HAUSMANN, Rudolf. *História da Biologia Molecular*. Trad. Celma E. Lynch de Araujo Hausmann. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1997.

HUECK, Kurt. *As florestas da América do Sul*. Trad. Hans Reichardt. São Paulo/Brasília: Polígono/Universidade de Brasília, 1972.

MADER, Sylvia S. *Biology*. 6. ed. Boston: McGraw-Hill, Inc., 1998.

MAYR, Ernst. *What evolution is*, Basic Books, New York, 2001.

MEYER, Don E. (supervisor) *Biologlcal science, a molecular approach*. 4. ed. Lexington, Massachusetts: D. C. Heath and Company, 1980.

MOONEY, P. Roy. *O escândalo das sementes: o domínio na produção de alimentos*. Trad. de Adilson D. Paschoal. São Paulo: Nobel, 1987.

MOORE, John A. Science as a way of knowing — Human ecology. *American Zoologist*, v. 25, 483-637, 1985.

__________ Science as a way of knowing — A conceptual framework for biology. *American Zoologist*, v. 30. p. 858-980, 1990.

__________ Science as a way of knowing — Evolution biology. *American Zoologist*, v. 24, p. 467-534, 1984.

__________ Science as a way of knowing — Genetics. *American Zoologist*, v. 26, p. 583-747, 1986.

OLBY, Roberts. *Origins of Mendelism*. 2. ed. Chicago: The University of Chicago Press Ltd., 1985.

OREL, Vítezslav. *Gregor Mendel: the first geneticist*. Trad. para o inglês de Stephen Finn. Oxford: Oxford University Press, 1996.

PORTUGAL, Franklin H. & COHEN, Jack S. *A century of DNA*. Massachusetts: The MIT Press, 1977.

RAWN, J. David. *Biochemistry*. Burlington, North Caroline: Neil Patterson Publishers. Caroline Biological Supply Company, 1989.

ROSE, Michael. *O espectro de Darwin*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

RUSE, Michael. *Levando Darwin a sério: uma abordagem naturalística da filosofia*. Trad. Regina Regis Junqueira. Belo Horizonte: Itatiaia, 1995.

SINNOT, Edmund W., DUNN, L. C. & DOBZHANSKY, Theodosius. *Princípios de Genética*. Trad. Antônio Prevosti. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1961.

STEBBINS, G. Ledyard. *Processos de evolução orgânica*. 2. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos/EDUSP, 1974.

STORER, Tracy & USINGER, Robert L. *Zoologia geral*. Trad. de Cláudio Gilberto Froehlich e outros. 3. ed. São Paulo: Nacional, 1977.

SUZUKI, David & KNUDTSON, Peter. *Genethics the ethics of engineering life*. Australia: Allen & Unwin Australia Pty Ltd., 1992.

TIEZZI, Enzo. *Tempos históricos* e *tempos biológicos*. *A Terra ou a morte: os problemas da nova ecologia*. Trad. Frank Roy Cintra Ferreira e Luiz Eduardo de Lima Brandão. São Paulo: Nobel, 1988.

WHITFIELD, Philip. *From so simple a beginning: the book of evolution*. New York: The Macmilliam Company, 1993.

RESPOSTAS

A BIOLOGIA NO VESTIBULAR

PARTE I

Cap. 1 As origens da genética

20. d; **21.** a; **22.** c; **23.** d; **24.** d; **25.** b.

26. a) Durante a ovulogênese, um oócito primário origina um óvulo e três corpúsculos polares. **b)** O espermatócito primário é uma célula diplóide ($2n = 20$), que dará origem aos espermatozóides através da meiose. Os espermatozóides, resultantes de uma divisão reducional, terão 10 cromossomos (células haplóides). **c)** O espermatozóide é reduzido e possui o flagelo utilizado para a movimentação até o óvulo. O gameta feminino é imóvel e possui grande quantidade de substâncias de reserva (vitelo) em seu citoplasma.

27. a) I = zigoto; II = esporos; III = gametas. **b)** X (esporófito): $2n = 24$; Y e Z (gametófitos): $n = 12$.

28. A figura 1 corresponde ao epitélio intestinal, pois a quantidade de ADN inicialmente é duplicada e, depois, volta ao valor inicial, caracterizando uma divisão celular por mitose. A figura 2 corresponde às células do ovário, pois a quantidade final de ADN é igual à metade da quantidade inicial, indicando a ocorrência da divisão celular por meiose.

Cap. 2 Lei da segregação genética

32. c; **33.** b; **34.** b; **35.** b; **36.** b; **37.** b.

Cap. 3 Relação entre genótipo e fenótipo

66. a; **67.** b; **68.** b; **69.** b; **70.** d; **71.** d; **72.** d; **73.** e; **74.** b; **75.** e; **76.** d; **77.** d; **78.** c; **79.** a; **80.** e; **81.** c; **82.** c.

83. a) Os resultados obtidos nos cruzamentos entre as plantas que produziram os frutos sugerem um caso de herança sem dominância (ou codominância). Do cruzamento de uma variedade de plantas com frutos longos (*LL*) com a variedade que produz frutos redondos (*RR*) resulta 100% dos descendentes com um fenótipo intermediário, ou seja, as plantas heterozigotas (*LR*) apresentam frutos ovais. **b)** Alelos: *L* - fruto longo; *R* - fruto redondo. Parentais: $LR \times LR$. Descendentes: 25% *LL* : 50% *LR* : 25% *RR*

84. a) Heterozigotos (*Aa*): II-1, II-2, II-3 e II-4. **b)** Geração parental: (II-2) $Aa \times Aa$ (II-3). **c)** Geração possível: (*AA*, *Aa*, *Aa*) e (*aa*); 3/4 normais, 1/4 afetados. P (homem afetado) = $1/2 \times 1/4 = 1/8$; P (2 homens afetados) = $1/8 \times 1/8 = 1/64$.

85. a) O casal é constituído por indivíduos heterozigotos (*Dd*). **b)** 2/3. **c)** 2/3. **d)** 1/6. **e)** Nenhuma. O gene dominante *D* é letal em homozigose.

86. a) A identificação pode ser feita pela tipagem sangüínea. Nesse processo, o sangue a ser analisado é misturado com o soro que contém os anticorpos de cada tipo sangüíneo; a aglutinação do sangue indica a presença de antígeno. **b)** Pessoas com sangue do tipo O apresentam todos os anticorpos; por isso não podem receber sangue de outro tipo. O grupo sangüíneo AB apresenta todos os antígenos, por isso não pode ser doado para pessoas de outros tipos.

87. Caso 1: pais impossíveis – B e O. Caso 2: pai impossível – O. Caso 3: pai impossível – AB.

88. a) A eritroblastose fetal ocorre por incompatibilidade do fator Rh entre o feto Rh^+ e a mãe Rh^-, sensibilizada por transfusão sangüínea Rh^+ ou por parto anterior de uma criança Rh^+. Os anticorpos (anti-Rh^+) produzidos pela mãe sensibilizada destroem os glóbulos vermelhos fetais. **b)** Para evitar a ocorrência da eritroblastose fetal, a mãe deve receber injeções contendo anti-Rh logo após cada parto. Os anticorpos anti-Rh destroem os glóbulos vermelhos fetais com o antígeno Rh que circulam no sangue materno. **c)** O tratamento usual para a criança afetada pela doença consiste em transfusão Rh^- em substituição ao sangue Rh^+ que contém os anticorpos maternos; banhos de luz para diminuir a icterícia causada pela destruição das hemácias fetais e nutrição adequada para reverter o quadro de anemia.

89. As extremidades do corpo perdem calor para o meio ambiente mais facilmente; por isso, costumam apresentar temperatura inferior à do restante do corpo. Como a enzima só é ativa abaixo de 34° C, a síntese do pigmento que confere cor negra só ocorre nas extremidades do corpo.

Cap. 4 Lei da segregação independente dos genes

35. c; **36.** c; **37.** b; **38.** b; **39.** b; **40.** b; **41.** a; **42.** a; **43.** d; **44.** c; **45.** b; **46.** c; **47.** b; **48.** b; **49.** a; **50.** c; **51.** d.

52. a) Os alelos que determinam as características semente rugosa e semente verde são recessivos. Portanto, não se expressam na geração F_1. **b)** Os fatores referidos por Mendel são os genes que estão situados nos cromossomos. **c)** Alelos: *V* (amarela), *v* (verde). Pais: $VV \times vv$; F_1: 100% *Vv* (autofecundação); F_2: 25% *VV* : 50% *Vv* : 25% *vv* (75% amarela : 25% verdes).

53. a) Alelos: *A* (longo), *a* (curto); *B* (redondo), *b* (oval). Cruzando as linhagens homozigotas obtém-se a F_1, que intecruzada produzirá, na F_2, plantas com caule curto e frutos ovais. Cruzamentos: P: *AAbb* × *aaBB*; F_1: *AaBb* × *AaBb*; F_2: 9*A_B_* : 3*A_bb* : 3*aaB_* : 1*aabb*. **b)** Proporção esperada para plantas com caule curto e frutos ovais (*aabb*) é de 1/16.

54. $1/32 \approx 3\%$

55. a) Macho: *DdMm*; fêmea: *ddMm*. **b)** 1/4.

Cap. 5 O mapeamento dos genes nos cromossomos

26. e; **27.** d; **28.** d; **29.** d; **30.** a; **31.** a; **32.** d.

33. a) No núcleo dos espermatozóides produzidos pelo verme seria observado um cromossomo e, portanto, uma molécula de DNA. **b)** *AB*, *Ab*, *aB* e *ab*. **c)** Os genes estão em ligação fatorial e, se não dispomos da freqüência de permutação ou da distância entre os citados genes, torna-se impossível prever a proporção de cada tipo de gameta formado pelo animal.

34. a) Todos os grupos trabalharam com genes ligados no mesmo cromossomo. A recombinação gênica (*crossing-over*) não ocorre entre genes localizados em cromossomos diferentes. **b)** Ligação gênica (ou *linkage*) refere-se a genes situados linearmente no mesmo cromossomo. Genes próximos permutam com menor freqüência, genes mais distantes apresentam maior taxa de recombinação. Deste modo, através da análise das taxas de recombinação, é possível ter-se uma noção relativa das distâncias entre os genes ligados. De posse das distâncias relativas pode-se, então, elaborar mapas cromossômicos. **c)** Os genes pesquisados pelo grupo G2 distam entre si 14 unidades de recombinação (UR), pois permutam com uma freqüência de 14%.

35. a) Tipos de gametas: *Ab D*, *Ab d*, *aB D* e *aB d*. **b)** Pares de alelos com segregação independente: *Aa* e *Bb* com *Dd*.

36. a) Ligação fatorial incompleta com freqüência de permutação igual a 10%. **b)** *AB/ab* = 45%. **c)** *Ab/ab* = 5%.

37. Sim. A segunda lei de Mendel considera apenas a segregação independente, o que só ocorre quando se consideram locos em cromossomos diferentes.

Cap. 6 Herança e sexo

40. e; **41.** b; **42.** a; **43.** a; **44.** e; **45.** b; **46.** b; **47.** c; **48.** c; **49.** a.

50. As células sangüíneas são derivadas da medula óssea e, portanto, vieram de um doador do sexo feminino (XX). As células que não são derivadas da medula, como as do epitélio intestinal e músculo liso, possuem o cariótipo masculino (XY), portanto o receptor é do sexo masculino.

51. a) O consultante não transmitirá a doença a seus filhos e filhas. **b)** Filhas: 100%; filhos: 0%.

52. a) 1/4. **b)** 1/2. **c)** O fenótipo da avó materna era normal uma vez que sua filha (I - 2), que recebeu o gene para hemofilia de seu pai, é normal.

53. Os genes para preto e para amarelo estão no cromossomo X. Como os gatos do sexo masculino têm apenas um cromossomo X, só poderão ter um dos genes ligados ao sexo, preto ou amarelo, além do gene autossômico. As fêmeas, que possuem dois cromossomos X, podem ter os dois alelos para cor, além do gene autossômico para a cor branca.

Cap. 7 Do genótipo ao fenótipo: como se expressam os genes

43. a; **44.** b; **45.** c; **46.** e; **47.** b; **48.** d; **49.** c; **50.** d; **51.** a; **52.** c; **53.** d; **54.** e; **55.** d; **56.** a; **57.** a; **58.** c; **59.** e; **60.** d.

61. a) RNAm: UCC GUU AAU UCC GGC AAG. **b)** O códon mutado, TTA, especificaria o terceiro aminoácido da tabela. **c)** UUA.

62. a) Do ponto de vista genético, poderiam ocorrer três tipos de albinismo, pois estão envolvidos três pares de genes para a produção do pigmento no animal. Defeitos no gene *A* impedem a formação do composto 1, interrompendo toda a cadeia de reações que levam ao desenvolvimento da cor. Alterações no gene *B* acarretam a não formação do composto 2, resultando também na não formação da pigmentação. Mutações no gene *C* impedindo a síntese do composto 3, também causariam albinismo. **b)** Genótipo de pais de linhagens puras portadores de dois tipos distintos de albinismo: *AAbbCC* × *AABBcc*. Geração: *AABbCc* - 100% pigmentados. **c)** Devido à degeneração do código genético, um aminoácido pode ser determinado por diferentes códons. Assim, uma mutação em um gene, pode não causar qualquer alteração na proteína codificada.

Cap. 8 Engenharia Genética e Biotecnologia

44. c; **45.** d; **46.** a; **47.** c; **48.** a; **49.** a; **50.** a; **51.** b.

52. a) Alfredo é filho de um dos gêmeos dizigóticos. O gêmeos são geneticamente diferentes tornando possível a determinação da paternidade através da análise do DNA. **b)** Renato é filho de um dos gêmeos monozigóticos. Tais gêmeos são idênticos geneticamente, o que impossibilita a determinação da paternidade pelo exame do DNA.

53. Como o projeto visava determinar a seqüência completa de todos os cromossomos humanos, era importante incluir nesse conjunto o cromossomo Y. Como o cromossomo Y só existe nos indivíduos do sexo masculino, o doador teria que ser um indivíduo desse sexo.

54. No caso do seqüenciamento direto do DNA, os resultados revelam tanto a seqüência das regiões codificadoras (os genes) quanto a das não codificadoras, que representam quase 90% do genoma. Com a segunda estratégia são seqüenciados somente os genes, isto é, regiões codificadoras.

55. a) Endonucleases de restrição são enzimas que cortam o DNA em locais específicos. Ligases são enzimas que permitem a associação dos trechos cortados a outro segmento de DNA que será utilizado como vetor.
b) A tecnologia do DNA recombinante permite a inserção de genes (DNA) em organismos de espécies diferentes. Os organismos que recebem o DNA recombinante são chamados transgênicos. **c)** Insulina e somatotrofina são exemplos de substâncias produzidas pela tecnologia do DNA recombinante.

PARTE II

Cap. 9 Breve história das idéias evolucionistas

39. a; **40.** a; **41.** d; **42.** c; **43.** b; **44.** a) V; b) V; c) F; d) F; e) V; **45.** a; **46.** e; **47.** a; **48.** c; **49.** e.

50. a) O macho que detém o território de melhor qualidade é escolhido primeiro. **b)** As fêmeas que escolhem os machos que ocupam os melhores territórios têm, evolutivamente, mais chance de criar sua prole; a seleção natural, portanto, deve ter favorecido os machos que foram mais bem-sucedidos na disputa pelo hábitat e também aquelas fêmeas com maior capacidade de analisar a qualidade do território ocupado por um macho.

51. a) Os coelhos foram submetidos a um processo de seleção natural, ou seja, foram eliminados os animais sensíveis e preservados os resistentes que puderam recuperar o tamanho da população. **b)** Os mosquitos vetores contribuíram para a sobrevivência dos coelhos transmitindo entre os indivíduos desta população formas atenuadas do vírus mixoma, o que atuou como uma vacina natural, induzindo a formação de anticorpos nos coelhos.

52. a) Segundo a teoria lamarckista os antibióticos induziram a resistência em algumas bactérias. **b)** Segundo a teoria darwinista os antibióticos agem como agentes selecionadores, portanto sobrevivem as bactérias resistentes.

53. A adição do antibiótico causou a morte de grande parte da população inicial de bactérias. Entretanto, graças à variabilidade existente entre os organismos, algumas bactérias que já apresentavam resistência a esta droga sobreviveram e se multiplicaram, gerando uma população composta de bactérias resistentes. Novas aplicações do mesmo antibiótico não serão mais eficientes para reduzir esta população, que tende a crescer de acordo com os recursos disponíveis no meio.

Cap. 10 Teoria moderna da evolução

47. e; **48.** b; **49.** b; **50.** a; **51.** d; **52.** c; **53.** e; **54.** c; **55.** e; **56.** a, e, f; **57.** e; **58.** b; **59.** d; **60.** c.

61. a) O registro fóssil, que revela a existência de espécies extintas atualmente; a presença de órgãos homólogos (ou seja, de mesma origem embrionária, mas com funções diferentes), como o braço humano e a asa de uma ave e as semelhanças bioquímicas entre os seres vivos, como a universalidade do código genético. **b)** Porque a alteração na seqüência de bases nitrogenadas pode levar à produção de uma nova proteína, conferindo características novas (benéficas ou deletérias) ao portador da mutação.

62. a) A utilização de uma única droga poderia selecionar vírus resistentes, cuja multiplicação daria início a uma população resistente à droga em questão. **b)** A administração conjunta das três drogas é capaz de eliminar vírus que já sejam resistentes a uma ou duas delas. Para sobreviver a este tratamento, um vírus precisaria ter genes de resistência para as três drogas simultaneamente.

63. Uma vez cessada a administração de antibióticos, fator que selecionava as bactérias resistentes, a população de bactérias sensíveis voltou a crescer impulsionada pela multiplicação dos indivíduos sensíveis remanescentes. A competição das bactérias sensíveis com as resistentes reduz a porcentagem das últimas na população.

Cap. 11 Origem das espécies e dos grandes grupos de seres vivos

47. d; **48.** e; **49.** a; **50.** d; **51.** e; **52.** e; **53.** b; **54.** b; **55.** d; **56.** e; **57.** a) F; b) F; c) V; d) V; e) V; **58.** a; **59.** d; **60.** b; **61.** c.

62. a) Variações hereditárias são resultantes de mutações, recombinações gênicas, combinações cromossômicas na gametogênese e na fecundação. **b)** A seleção natural e a deriva genética (acaso) direcionaram a formação distinta dos dois grupos em ambientes diferentes. **c)** A especiação é conseqüência da seleção diferenciada a partir de uma

população ancestral. Seus componentes, através de migrações, se isolaram geograficamente e, após muitas gerações, foram fixadas novas variações que resultaram em isolamento reprodutivo.

63. a) A seleção natural diferencial, ocorrida durante milhares de anos, resultou nas diferenças morfológicas observadas nas populações isoladas geograficamente. **b)** As populações formarão raças geográficas de uma mesma espécie caso as diferenças resultantes da seleção natural não impeçam o livre cruzamento e a produção de descendência fértil. Ao contrário, se for interrompido o fluxo gênico entre os indivíduos das populações, devido aos mecanismos que levam ao isolamento reprodutivo, pode-se considerar que houve especiação.

64. a) A seqüência de fatos é: III, I e II. **b)** As diferenças genéticas observadas são o resultado de mutações, recombinações gênicas, combinações cromossômicas na formação de gametas e da fecundação, característica da reprodução sexuada. A seleção natural é a responsável pela fixação das características adaptativas. **c)** O isolamento reprodutivo impede o fluxo gênico entre os indivíduos das populações que, então, passam a constituir espécies diferentes.

65. a) 63 cromossomos. **b)** Não. Jumento e égua já pertencem a espécies distintas, pois produzem descendência estéril.

66. a) Os cruzamentos citados produziram descendentes férteis, pois as populações A, B e D pertencem à mesma espécie. O fator inicial que pode ter originado as populações A, B, C e D foi o isolamento geográfico. **b)** Espécies diferentes que habitam a mesma região geográfica são denominadas simpátricas. O cruzamento entre o jumento e a égua produz a mula, animal vigoroso, porém estéril.

Cap. 12 Evolução humana

28. a; **29.** e; **30.** b; **31.** c; **32.** b; **33.** b; **34.** c; **35.** e.

PARTE III

Cap. 13 Fundamentos da Ecologia

27. d; **28.** b; **29.** d; **30.** d; **31.** c; **32.** b; **33.** e; **34.** b; **35.** b; **36.** e; **37.** e; **38.** b; **39.** c; **40.** a; **41.** d; **42.** d.

43. a) Comunidade biótica ou biocenose. **b)** Ecossistema.

44. a) A coluna "Diferença" representa a quantidade de energia utilizada para a manutenção da vida dos componentes de cada nível trófico. **b)** A perda de energia ao passar de um nível trófico para outro é significativa, o que impede que esta cadeia alimentar apresente consumidores quaternários.

45. a) O teor de água varia muito de acordo com o tipo de organismo nos diferentes níveis tróficos. Por isso, a massa seca reflete melhor o teor de matéria orgânica presente em cada nível. **b)** A quantidade de matéria diminui porque uma parte é convertida em energia. O restante é incorporado e fica disponível para o nível trófico seguinte. **c)** Musgos: produtores; gafanhotos: consumidores primários; sapos: consumidores secundários; cobras: consumidores terciários.

46. a) Consumidor secundário e terciário. **b)** Cinco. **c)** Alimentando-se de ratos.

Cap. 14 Energia e matéria nos ecossistemas

37. a; **38.** e; **39.** a; **40.** b; **41.** e; **42.** a; **43.** b; **44.** a; **45.** a; **46.** b; **47.** a; **48.** e; **49.** b; **50.** c; **51.** c.

52. Na zona tropical, pois a maior parte dos nutrientes esta localizada nas plantas. Esses nutrientes seriam retirados junto com as árvores, restando na região um solo muito pobre para a agricultura.

53. a) O oxigênio liberado na fotossíntese serve como parâmetro para medir a quantidade do outro produto desse processo: a matéria orgânica. **b)** Na garrafa iluminada ocorre tanto fotossíntese como respiração. Assim, é impossível determinar com precisão a quantidade de oxigênio liberada na fotossíntese, uma vez que parte deste foi consumida na respiração. A determinação da quantidade de oxigênio consumida na respiração é feita medindo-se o volume de oxigênio dissolvido na garrafa escura, na qual ocorre somente a respiração. A produtividade primária desse ecossistema pôde ser obtida somando-se o volume de oxigênio das duas garrafas. **c)** Algas microscópicas componentes do fitoplâncton.

54. a) Os fluxos B e D indicam o processo de fotossíntese, ou seja, a transformação de compostos inorgânicos em substâncias orgânicas. A eliminação de carbono pela respiração aeróbica está indicada pelos fluxos A e C. A fermentação, realizada pelos organismos decompositores está indicada pelo fluxo E. **b)** O fluxo F, relacionado com a liberação de carbono para a atmosfera, reflete a atividade de queima de combustíveis fósseis, como por exemplo nas termoelétricas que produzem energia a partir da combustão do carvão mineral.

55. a) Bactérias e cianobactérias. **b)** As bactérias transformam nitrogênio livre em nitrato, facilitando a sua absorção pelos vegetais.

56. a) Nitrogênio. **b)** A ação de bactérias fixando nitrogênio atmosférico em compostos facilmente absorvidos pelas plantas e liberando este gás novamente para a atmosfera. **c)** Proteínas e ácidos nucléicos (DNA e RNA).

57. a) A maior produtividade deve ocorrer na área recém-desmatada porque nessa região a taxa de nutrientes minerais do solo, inclusive o nitrato, é mais elevada, uma vez que ainda não ocorreu a erosão e a lixiviação. **b)** O elemento químico presente no nitrato (NO_3^-) é o nitrogênio. Os átomos desse elemento são utilizados na síntese de compostos orgânicos nitrogenados como as proteínas e os ácidos nucléicos (DNA e RNA).

58. a) Os animais obtêm nitrogênio por meio da alimentação. **b)** Todos. **c)** A decomposição contribui para a reciclagem dos nutrientes minerais na natureza.

Cap. 15 Dinâmica das populações biológicas

26. e; **27.** e; **28.** a) F; b) F; c) V; d) V; e) V; **29.** c; **30.** b; **31.** b; **32.** e; **33.** d; **34.** e; **35.** b; **36.** b; **37.** e; **38.** e.

39. a) O crescimento da população de predadores nos pontos I, II e III está diretamente relacionado com o aumento anterior do número de presas. **b)** A população de herbívoros aumentaria inicialmente. Após determinado tempo entraria em declínio devido à falta de alimento disponível.

40. a) Predador (linha I) X presa (linha II). **b)** Os predadores poderiam ser gatos-do-mato e as presas, roedores. **c)** Manutenção do equilíbrio populacional entre predadores e presas. **d)** O desmatamento causará a eliminação dos consumidores primários (roedores) e, conseqüentemente, de seus predadores (gatos-do-mato).

41. a) *Paramecium caudatum* e *Paramecium bursaria* não ocupam o mesmo nicho ecológico, como mostra o gráfico A. *Paramecium caudatum* e *Paramecium aurelia* exploram o mesmo nicho ecológico (gráfico B). **b)** *Paramecium caudatum* e *Paramecium bursaria*, cultivados juntos, ocupam diferentes regiões no mesmo frasco, deste modo não competem por espaço e alimento.

42. a) Predadores contribuem para a manutenção do equilíbrio populacional das presas, evitando a exaustão dos recursos ambientais, além de selecionarem os indivíduos mais aptos. **b)** Os herbívoros que devoram sementes que contêm embriões podem ser considerados predadores, pois causam a morte precoce do vegetal. Os comedores de folhas se utilizam de parte do vegetal, não causando, necessariamente, sua morte.

43. a) O caramujo *Biomphalaria glabrata* está relacionado com a esquistossomose (ou barriga d'água). Ele é o hospedeiro intermediário do verme *Shistossoma mansoni*, causador da doença. A contaminação ocorre em águas de lagos, lagoas, represas, açudes e outros ambientes de água parada. **b)** A proliferação rápida pode ser causada, por exemplo, pela ausência de predadores ou competidores naturais.

44. a) Se não estiver ocorrendo imigração a taxa de natalidade supera a taxa de mortalidade nos períodos de maio a setembro, de dezembro a janeiro e de março a abril, pois houve aumento no número de indivíduos da população.

b) O decréscimo da população pode ter sido causada por diversos fatores, entre eles: incapacidade reprodutiva, competição por alimento, emigração, predatismo, parasitismo etc.

Cap. 16 Relações ecológicas entre seres vivos

40. d; **41.** e; **42.** c; **43.** d; **44.** a; **45.** c; **46.** d; **47.** b.

48. a) O cipó-chumbo é um vegetal aclorofilado e, por esse motivo, retira a seiva elaborada ou orgânica da planta hospedeira. **b)** As estruturas invadidas pelo cipó-chumbo são os vasos liberianos (floema ou líber) de onde o parasita retira seiva elaborada. As raízes da erva-de-passarinho invadem apenas os vasos lenhosos (xilema ou lenho) de onde retiram seiva bruta.

49. As bactérias simbióticas fixam o nitrogênio do ar, facilitando a absorção deste elemento pelas plantas. Em contrapartida, as células vegetais fornecem para as bactérias substâncias orgânicas produzidas a partir da fotossíntese. A associação beneficia, portanto, ambos os organismos.

50. a) A interação ecológica observada entre o caranguejo-eremita e as anêmonas em A é a protocooperação, enquanto em B, ocorre mutualismo entre a leguminosa e bactérias. **b)** Mutualismo é uma interação necessária para a sobrevivência das espécies associadas; isso não ocorre com a protocooperação.

51. a) Predatismo. **b)** Os pássaros em questão exploram diferentes microambientes. O pássaro A consome os insetos das folhas, o pássaro B alimenta-se dos insetos dos pecíolos, e o C é predador dos insetos que se localizam nos ramos principais.

Cap. 17 Sucessão ecológica e biomas

55. b; **56.** e; **57.** b; **58.** a; **59.** e; **60.** d; **61.** b; **62.** a) F; b) V; c) F; d) F; e) V; f) V; **63.** d; **64.** e; **65.** a; **66.** d; **67.** c; **68.** b.

69. a) Sucessão ecológica primária é o estabelecimento de uma comunidade em um ambiente antes desabitado. São exemplos a formação de vege-

tação sobre rochas nuas ou sobre lavas solidificadas de vulcões. Secundária é a sucessão que ocorre em áreas que já foram ocupadas por uma comunidade biológica e que foram devastadas naturalmente ou pela atividade humana. Esse tipo de sucessão ocorre em lavouras abandonadas, florestas derrubadas ou em áreas cuja vegetação foi queimada. **b)** Comunidade clímax é o nome dado ao estágio final de sucessão ecológica. Esse estágio é condicionado pelas condições físicas e climáticas do local.

70. a) X. **b)** Há maior diversidade no estágio X. Na comunidade clímax há o maior número possível de nichos ecológicos. **c)** Em X há equilíbrio entre a produtividade e o consumo. Em Y, que representa os estágios iniciais da sucessão ecológica, a produtividade é maior do que o consumo.

71. a) Florestas. **b)** Anfíbios são adaptados a ambientes úmidos, típicos de biomas florestais.

72. a) A folha mostrada pela figura B indica uma planta que vive em campo aberto, pois estas possuem folhas com menor superfície para evitar a transpiração excessiva. A figura A indica uma folha de vegetal habitante de floresta, já que apresenta maior superfície adaptada ao melhor aproveitamento de luz. **b)** A folha A possui maior quantidade de clorofila. Em ambientes menos iluminados a produção dos pigmentos fotossintetizantes aumenta para intensificar a captação de luz.

Cap. 18 Humanidade e Ambiente

41. d; **42.** e; **43.** c; **44.** e; **45.** b; **46.** b; **47.** c; **48.** b; **49.** c; **50.** b; **51.** d; **52.** b; **53.** d; **54.** d; **55.** b; **56.** e; **57.** e; **58.** c; **59.** e; **60.** a; **61.** a; **62.** a; **63.** a; **64.** a.

65. O CO_2 é um dos gases atmosféricos que contribui para o efeito estufa, pois retém grande quantidade de radiação infravermelha que reirradia para a atmosfera terrestre. O aumento de áreas florestadas pode diminuir a quantidade de CO_2 da atmosfera, pois este é utilizado na fotossíntese para formar a matéria orgânica de que são constituídas as árvores.

66. a) A atmosfera desempenha um papel fundamental na manutenção do clima da Terra. Ela funciona como uma manta gasosa que retém o calor irradiado pela superfície terrestre, mantendo assim a temperatura relativamente elevada. Esse fenômeno é o efeito estufa natural. Muitos cientistas acreditam que o efeito estufa está sendo intensificado pela poluição, ocasionando um aquecimento do planeta maior do que o normal. **b)** As árvores podem contribuir para contrabalançar as emissões de CO_2 porque removem da atmosfera grande quantidade desse gás e também de poluentes tóxicos, como o dióxido de enxofre (SO_2). Elas utilizam o CO_2 da atmosfera para os processos fotossintéticos, com produção final de oxigênio e carboidratos.

67. a) O monóxido de carbono (CO) combina-se com a hemoglobina tornando-a inutilizável para o transporte de oxigênio. **b)** Metais pesados são substâncias não biodegradáveis e, quando assimilados pelos seres vivos, apresentam efeito cumulativo nas cadeias alimentares. Tal efeito pode causa prejuízos incalculáveis para a biodiversidade, principalmente para os elos finais das cadeias e teias alimentares.

68. Como os coliformes naturalmente fazem parte da flora intestinal, sua presença na água indica contaminação por esgotos. Uma grande quantidade de coliformes indica também a possível presença de parasitas intestinais.

69. a) Águas poluídas apresentam alta DBO, alta incidência de coliformes fecais e baixo teor de oxigênio dissolvido. Predomínio de processos anaeróbicos. Águas não poluídas possuem pequena DBO, baixa quantidade de coliformes fecais e alto teor de oxigênio dissolvido. Conseqüentemente, há predomínio de processos aeróbicos. **b)** Anaeróbicos facultativos são microrganismos capazes de realizar a respiração aeróbica e anaeróbica. Utilizam, ou não, o oxigênio livre para produzir energia. **c)** Cólera (*Vibrio cholerae*), Febre Tifóide (*Salmonella typhi*), Leptospirose (*Leptospira sp.*).

Lista de Siglas de Universidades/Faculdades

Sigla	Nome oficial
Enem-MEC	Exame Nacional do Ensino Médio
Fatec-SP	Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Ceeteps-SP)
FGV-SP	Fundação Getúlio Vargas
Fuvest-SP	Fundação Universitária para o Vestibular
Mackenzie-SP	Universidade Presbiteriana Mackenzie (MACK)
PUC-Campinas-SP	Pontifícia Universidade Católica de Campinas (Puccamp)
PUC-MG	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (atual PUC-Minas)
PUC-Minas	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (a partir de 2002)
PUC-PR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
PUC-RJ	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PUC-RS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PUC-SP	Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Uece	Universidade Estadual do Ceará
UEL-PR	Universidade Estadual de Londrina
Uerj	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Uespi	Universidade Estadual do Piauí
Ufal	Universidade Federal de Alagoas
UFC-CE	Universidade Federal do Ceará
Ufes	Universidade Federal do Espírito Santo
UFF-RJ	Universidade Federal Fluminense
UFJF-MG	Universidade Federal de Juiz de Fora
Ufla-MG	Universidade Federal de Lavras (UFLA)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFMS	Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFPel-RS	Fundação Universidade Federal de Pelotas
UFPI	Fundação Universidade Federal do Piauí
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS-RS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar-SP	Fundação Universidade Federal de São Carlos
UFSM-RS	Universidade Federal de Santa Maria
UFS-SE	Fundação Universidade Federal de Sergipe
UFU-MG	Fundação Universidade Federal de Uberlândia
UFV-MG	Fundação Universidade Federal de Viçosa
UnB-DF	Fundação Universidade de Brasília
Unesp	Universidade Estadual Paulista
Unicamp-SP	Universidade Estadual de Campinas
Unifesp	Universidade Federal de São Paulo
Unifor-CE	Universidade de Fortaleza
Unimep-SP	Universidade Metodista de Piracicaba
Unirio-RJ	Fundação Universidade do Rio de Janeiro
U. Tocantins-TO	Universidade de Tocantins
Vunesp	Fundação para o Vestibular da Unesp

A NOVA NOMENCLATURA ANATÔMICA

NOME SUGERIDO	NOME ANTIGO	COMENTÁRIOS
Apêndice vermiforme	Apêndice cecal	Ligado ao colo, próximo à junção entre o intestino delgado e o intestino grosso.
Articulação	Junta	Local de contato, fixo ou móvel, entre ossos do esqueleto.
Bulbo do olho	Globo ocular	Localiza-se na cavidade orbital, na face.
Cápsula do glomérulo renal	Cápsula de Bowman	Faz parte do néfron (rim). Mudança devida a epônimo.
Carpais	Carpos	Ossos do pulso.
Cavidades nasais	Fossas nasais	Cavidades do nariz que se abrem nas narinas.
Cíngulo do membro inferior	Cintura pélvica	Conjunto de ossos que articula o tronco e os membros inferiores.
Cíngulo do membro superior	Cintura escapular	Conjunto de ossos que articula o tronco e os membros superiores.
Digestório **Sistema digestório** **Tubo digestório**	Digestivo Sistema digestivo Tubo digestivo	O sistema digestório é constituído pelo tubo digestório (boca, faringe, estômago, intestino etc.) e glândulas associadas (fígado, pâncreas etc.).
Ducto **Ducto deferente** **Ducto pancreático**	Duto (ou canal) Vaso ou canal deferente Duto ou canal pancreático	 Conduto do sistema genital masculino. Conduto que liga o pâncreas ao duodeno.
Escápula	Omoplata	Osso do cíngulo do membro superior.
Fíbula	Perônio	O mais fino dos dois ossos da perna (o outro é a tíbia).
Glândula seminal	Vesícula seminal	Glândula associada ao sistema genital masculino.
Glândula submandibular	Glândula submaxilar	Acompanha a mudança de maxilar inferior para mandíbula.
Glândula supra-renal	Glândula adrenal	Localiza-se sobre a parte superior dos rins.
Glomérulo renal	Glomérulo de Malpighi	Faz parte do néfron (rim). Mudança devida a epônimo.
Gustatório **Papila gustatória**	Gustativo Papila gustativa	 As papilas gustatórias localizam-se na língua.
Ilhotas pancreáticas	Ilhotas de Langerhans	Compõem a parte endócrina do pâncreas. Mudança devida a epônimo.
Ílio	Ilíaco	Osso que faz parte do cíngulo do membro inferior.
Lente	Cristalino	Localiza-se no olho.
Linfonodo	Nódulo (ou gânglio) linfático	Os linfonodos fazem parte do sistema linfático.
Líquido cerebroespinhal	Líquido cefalorraquidiano	Líquido que preenche as cavidades internas do encéfalo e da medula espinhal.
Mandíbula	Maxilar inferior	Parte móvel do crânio, na qual se localizam os dentes inferiores.
Metacarpais	Metacarpos	Ossos da mão.
Metatarsais	Metatarsos	Ossos da planta do pé.
Nervos espinhais	Nervos raquidianos	Nervos ligados à medula espinhal.
Nó atrioventricular	Nódulo atrioventricular	Localiza-se na junção do átrio direito com o ventrículo direito.

NOME SUGERIDO	NOME ANTIGO	COMENTÁRIOS
Nó sinoatrial	Nódulo sinoatrial (ou marca-passo)	Localiza-se na junção da veia cava com o átrio direito.
Olfatório Epitélio olfatório	Olfativo Epitélio olfativo	O epitélio olfatório localiza-se nas cavidades nasais.
Orelha Orelha externa Orelha média Orelha interna	Ouvido Ouvido externo Ouvido médio Ouvido interno	É o órgão da audição. O que se chamava antigamente de orelha é o **pavilhão auricular**.
Órgão espiral	Órgão de Corti	Faz parte da orelha interna. Mudança devida a epônimo.
Osteônio	Sistema haversiano (ou Sistema de Havers)	Sistema de organização dos osteócitos nos ossos longos. Mudança devida a epônimo.
Papila ileal	Válvula ileocecal	Localiza-se na união entre o intestino delgado e o intestino grosso.
Patela	Rótula	Osso localizado na parte anterior do joelho.
Pregas vocais	Cordas vocais	Localizam-se no interior da laringe.
Proeminência laríngea	"Pomo-de-adão"	Cartilagem da laringe localizada na região da garganta, geralmente mais saliente nos homens que nas mulheres.
Pudendo feminino	Vulva	Parte externa do sistema genital feminino. Compõe-se dos **lábios maiores** (antes chamados grandes lábios), dos **lábios menores** (antes chamados pequenos lábios), do clitóris e do vestíbulo vaginal.
Segmento delgado	Alça de Henle	Faz parte do néfron (rim). Mudança devida a epônimo.
Sistema cardiovascular	Sistema circulatório	Constituído pelo coração e pelos vasos sangüíneos.
Sistema genital	Sistema reprodutor	Compõe-se de gônadas, condutos e órgãos dos sistemas genitais feminino e masculino.
Sistema urinário	Sistema excretor	Constituído pelos rins, condutos renais e bexiga urinária.
Tarsais	Tarsos	Ossos do tornozelo.
Tendão calcâneo	Tendão de Aquiles	O grande tendão do calcanhar. Mudança devida a epônimo.
Tonsila palatina	Amígdala	Órgão do sistema linfático, localizado na garganta.
Tuba auditiva	Trompa de Eustáquio	Faz parte da orelha. Mudança devida a epônimo.
Tuba uterina	Trompa de Falópio	Faz parte do sistema genital feminino. Mudança devida a epônimo.
Túbulo coletor reto	Ducto coletor	Conduto renal onde desembocam os néfrons.
Túbulo contorcido	Túbulo contornado	Os túbulos contorcidos **distal** e **proximal** são parte do néfron (rim).
Ulna	Cúbito	Um dos ossos do antebraço, cuja saliência forma o cotovelo.
Valva	Válvula	O novo nome refere-se às valvas internas do coração (**valvas atrioventriculares esquerda e direita**, **valva da aorta** e **valva do tronco pulmonar**). As partes que constituem essas valvas são **válvulas**. As válvulas internas das veias mantêm o nome de válvulas.

ÍNDICE REMISSIVO

C

I

Créditos das fotos

Parte I • Abertura: Fabio Colombini/Kino

Capítulo 1 • Abertura: Pascal Goetgheluck/SPL-Stock Photos - 1.1 Garcia-Pelayo/CID - 1.2 Klaus Guldbrandsen - 1.3 (A e B) Reprodução; (C) Kean Collection/Hulton Archive-Getty Images; (D) J. Gómez de Salazar/CID; (E) Bettmann/Corbis-Stock Photos - 1.4 (A a F) Reprodução - 1.7 (A a F) Reprodução. **Capítulo 2** • Abertura: SPL-Stock Photos - 2.1 (A) Aplicaciones Imagen/CID; (B) Biblioteca Nacional, Madrid/CID; (C) Cortesia da American Philosophical Society, Curt Stern Papers; (D) Dr. Szekely Wien - 2.2. Delfim Martins/ Olhar Imagem - 2.7 (superior direita) CID - 2.8 (superior direita) M.J.Higginson/SPL-Stock Photos - 2.9 (superior direita) José Mariano Amabis. **Capítulo 3** • Abertura: John Turner/ Stone Getty Images - 3.1 (esquerda) Nock Dolding/Taxi-Getty Images; (direita) Jim Arbogast/ Taxi-Getty Images - 3.2 (esquerda) CID; (direita) Jane Burton/Dorling Kindersley-Getty Images - 3.5 (A, da esquerda para a direita) Color-Pic/Animals Animals-Keystone; D. Robert Franz/Corbis-Stock Photos; Roger Tidman/Corbis-Stock Photos; Jonh Sann/Stone-Getty Images - 3.6 (superior direita) Eduardo Santaliestra/CID - 3.8 Tony Arruza/ Corbis-Stock Photos - 3.10 Luís Gomes/Abril Imagens - 3.12 José Mariano Amabis - 3.13 SPL-Stock Photos - 3.14 (A, três fotos) Fabio Colombini - 3.19 CID. **Capítulo 4** • Abertura: Peter Menzel/SPL-Stock Photos - 4.8 (extremo esquerdo) Fabio Colombini/Kino; (esquerda, direita e extremo direito) Fabio Colombini - 4.10 (A, C e D) Fabio Colombini; (B) Fabio Colombini/Kino - 4.16 Dale C. Spartas/Corbis-Stock Photos - 4.22 (esquerda) Tim Beddow/SPL-Stock Photos; (centro) Adam Hart-Davis/SPL-Stock Photos; (direita) Bob Elsdale/The Image Bank-Getty Images. **Capítulo 5** • Abertura: Fabio Colombini/Kino - 5.1 (esquerda) Nature Publishing Group; (direita) SPL-Stock Photos - 5.2 (A, C, D e E) Bettmann/Corbis-Stock Photos; (B) California Institute of Technology - 5.3 (B) José Mariano Amabis - 5.7 Deborah Tosi. **Capítulo 6** • Abertura: Frank Siteman/AGE-Keystock - 6.4 José Mariano Amabis - 6.5 e 6.10 CID - 6.12 Fabio Colombini - 6.13 CID. **Capítulo 7** • Abertura: Norbert Rosing/National Geographic-Getty Images - 7.1 (acima, esquerda e direita) Reprodução; (abaixo) Time Life Pictures-Getty Images - 7.2 Photo Researches/SPL-Stock Photos - 7.3 Omikron/PR-Stock Photos - 7.9 Fabio Colombini - 7.10 (esquerda) Bettmann/Corbis-Stock Photos; (direita) Hulton Archive/ Getty Images. **Capítulo 8** • Abertura: Philippe Plailly/SPL-Stock Photos - 8.1 (A, B e C) CID; (D) Fabio Colombini/Kino - 8.2 (A) Divulgação/ AE; (B) Yann Arthus-Bertrand/Corbis-Stock Photos; (C) Delfim Martins/ Pulsar - 8.4 Fabio Colombini - 8.5 (inferior esquerda) Gilberto G. Barbante/IBUSP - 8.6 CID - 8.7 (A) Almeida/Kino; (B) Haroldo Palo Jr./Kino - 8.13 Reprodução - 8.14 Reprodução - 8.19 (inferior esquerda) Donald R. Helinski / Universidade da Califórnia, San Diego.

Parte II • Abertura: Tui de Roy/Minden-Stock Photos

Capítulo 9 • Abertura: Annie Griffiths Belt/Corbis-Stock Photos - 9.1 Oronoz - 9.2 Goyenechea/CID - 9.3 (acima e abaixo) Fabio Colombini - 9.4 (A a C) CID; (D) Muñoz Robredo/CID - 9.6 (A e B) CID - 9.8 (A) Carlos Goldin/SPL-Stock Photos; (B) Antonio Viñas Valcarcel/CID; (C) Fabio Colombini; (D) Alfred Pasieka/SPL-Stock Photos - 9.13 (A e B) CID; (C) Mark Conlin/Taxi-Getty Images; (D) Fabio Colombini - 9.14 (A e B) Fabio Colombini; (C) N.K.D. Miller/ SPL-Stock Photos - 9.17 (esquerda) CID; (direita) Joe McDonald/ Corbis-Stock. **Capítulo 10** • Abertura: Fabio Colombini - 10.1 (A e C) SPL-Stock Photos; (B) Rick Friedman/Corbis-Stock Photos; (D) Courtesy of Botanical Society of America - 10.2 CID - 10.4 (acima e abaixo) Eye of Science/SPL-Stock Photos - 10.13 Torleif Svensson/ Corbis-Stock Photos - 10.18 (A a C) Danielle Tesseroli e Blanche C. Bitner-Mathé/UFRJ - 10.19 (esquerda) CID; (direita) Frans Lating/ Minden-Stock Photos - 10.20 (esquerda) Frans Lemmens/The Image Bank-Getty Images; (direita) Robert Pratta/Reuters-Newscom - 10.21 (acima e abaixo) Eduardo Santaliestra/CID - 10.22 (acima) Gerry Ellis/Midden-Stock Photos; (centro) Carlo Jimenez Perez/CID; (abaixo) Haroldo Palo Jr./Kino - 10.24 (acima) E. R. Degginger/Photo Researches-Stock Photos; (abaixo) CID. **Capítulo 11** • Abertura: Christian Darkin/SPL-Stock Photos - 11.2 Tim Davis/Stone-Getty Images - 11.7 (A) CID; (B) Thomas Mangelsen/Minden-Stock Photos; (C) Frans Lating/Minden-Stock Photos - 11.8 (A) Fabio Colombini; (B) I. Rovira Casadevall/CID; (C) Maurício Simonetti/Pulsar - 11.11 Muñoz Robredo/CID - 11.14 (A) Christian Jegou-Publiphoto Diffusion/SPL-Stock Photos; (B) Fabio Colombini/Kino; (C) Esgueva/ CID - 11.16 (A) Frans Lating/Minden-Stock Photos - 11.17 David A. Hardy, Futures: 50 Years in Space/SPL-Stock Photos. **Capítulo 12** • Abertura: Pascal Goetgheluck/SPL-Stock Photos - 12.1 Frans Lanting/Minden-Stock Photos - 12.2 Kenneth Garrett/National Geographic-Getty Images - 12.4 (A e E) Haroldo Palo Jr./Kino; (B e C) CID; (D) Flip Nicklin/Minden-Stock Photos - 12.5 S. Lobo Producciones/CID - 12.6 (A e C) CID; (B) Gerry Ellis/Minden-Stock Photos; (D) Tim Laman/National Geographic-Getty Images - 12.7 (A) Glória Jafet/Kino; (B) Luciano Candisani; (C) Fabio Colombini/ Kino; (D, E, F, I) CID; (G) Muñoz Robredo/CID; (H) Seridec Photoimagene/CID; - 12.9 (superior) Michael K. Nichols/National Geographic-Getty Images; (inferior) Renee Lynn Stone-Getty Images - 12.10 (A) CID; (B) Gerry Elis/Minden-Stock Photos; (C) Veer Solus/ Keystone - 12.11 (A) Martinez Zafra/CID; (B) Regis Bossu/Corbis-Stock Photos; (C) John Reader/SPL-Stock Photos - 12.12 Martinez Zafra/CID - 12.13 (B) Regis Bossu/Corbis-Stock Photos, (C) Pascal Goetgheluck/SPL-Stock Photos; (D) Pascal Goetgheluck/PR-Stock Photos; (E) John Reader/SPL-Stock Photos - 12.14 (A) Karen/Corbis Sygma-Stock Photos; (B) Pascal Goetgheluck/SPL-Stock Photos; (C) Martin Land/SPL-Stock Photos - 12.16 (A) Pascal Goetgheluck/SPL-Stock Photos; (B) Delfim Vieira/AE; (C) CID; (D) S.L.F. Ontañon/CID; (E) Rodriguez de Leiva/CID; (F) Lester Lefkowitz/Corbis-Stock Photos.

Parte III • Abertura: Fabio Colombini

Capítulo 13 • Abertura: CID - 13.1 Antônio Ribeiro/Gamma - 13.4 Fabio Colombini - 13.7 CID. **Capítulo 14** • Abertura: Jeff Hunter/Photographer's Choice-Getty Images - 14.6 (esquerda) Juca Martins/Olhar Imagem; (direita) Maurício Simonetti/Pulsar - 14.7 (B) Lepus/SPL-Stock Photos; (C) Fabio Colombini - 14.12 (B) Fabio Colombini/Kino; (C) Andrew Syred/SPL Stock Photos - 14.14 (esquerda e direita) Delfim Martins/Pulsar. **Capítulo 15** • Abertura: Danny Lehman/Corbis Stock-Photos - 15.1 (esquerda) Daniel Cymbalista/Pulsar; (direita) Ronaldo Kotscho/Kino - 15.7 Frans

Lanting/Minden-Stock Photos - 15.10 (superior esquerda) Tom Brakefield/Corbis Stock Photos - 15.11 (superior esquerda) Eye of Science/SPL-Stock Photos - 15.12 Delfim Martins/Pulsar. **Capítulo 16** • Abertura: Anthony Bannister-Gallo Images/Corbis-Stock Photos - 16.1 CID - 16.2 (A) James Bell/SPL-Stock Photos; (B) Peter Scoones/SPL-Stock Photos; (C) Douglas P. Wilson-Frank Lane/Corbis-Stock Photos; (D) CID - 16.4 (acima) Konrad Wothe/ Minden-Stock Photos; (abaixo) Fabio Colombini - 16.5 (A e B) Fabio Colombini; (C) Michael & Patricia Fogden/Minden-Stock Photos; (D) Mark Moffett/Minden-Stock Photos; (E) Mitsuhiko Imamori/ Minden-Stock Photos - 16.6 (A, C e D) Fabio Colombini; (B) Bryan Mullennix/ The Image Bank-Getty Images - 16.7 (A) Manu San Felix/CID; (B) S.L.F. Ontañon/CID - 16.8 (acima) Imagen Y Publicacion/CID; (abaixo) Esgueva/CID - 16.9 (superior, central, inferior esquerda e direita) CID - 16.10. Muñoz Robredo/CID - 16.11 (A) Stephen Frink/Corbis-Stock Photos; (B) Yann Arthus-Bertrand/Corbis-Stock Photos - 16.12 (A) Ana Maria Costa Leonardo; (B e C) Jeremy Burgess/SPL-Stock Photos - 16.13 (A, C e E) Fabio Colombini; (B) Esgueva/CID; (D) Gilberto Martho. **Capítulo 17** • Abertura: Gary Braasch/Corbis-Stock Photos - 17.1 (A) Muñoz Robredo/CID; (B) Robert Gill-Papilio/Corbis-Stock Photos - 17.4 Tui de Roy/Minden-Stock Photos - 17.10 (acima, esquerda) CID; (acima, centro) Colin Cuthbert/PR-Stock Photos; (acima, direita) Andre Gallant/The Image Bank-Getty Images; (abaixo, esquerda) Franklin Nolla/Kino; (abaixo, centro) Margarita Barrera/CID; (abaixo, direita) Muñoz Robredo/CID; (esquerda, no meio) José Lorman/CID - 17.11 (acima) Andre Gallant/The Image Bank-Getty Images; (abaixo) CID - 17.12 (acima) José Lorman/CID; (abaixo) Michio Hoshino/Minden-Stock Photos - 17.13 (acima e abaixo) CID - 17.14 (acima) Colin Cuthbert/PR-Stock Photos; (abaixo) Michael & Patricia Fogden Minden-Stock Photos - 17.15 (acima) Margarita Barrera/CID; (abaixo) Muñoz Robredo/CID - 17.16 (acima) Franklin Nolla/Kino; (abaixo) Yva Momatiuk/Minden-Stock Photos - 17.17 (acima) CID; (abaixo) Michael & Patricia Fogden/Minden-Stock Photos - 17.18 (coluna esquerda, de cima para baixo) Wagner Santos/ Kino; Fabio Colombini/Kino; Maurício Simonetti/Olhar Imagem; Maurício Simonetti/Olhar Imagem; Assis Hoffmann/Kino; (coluna central, acima) Fabio Colombini/Kino; (coluna central, abaixo) Adriano Gambarini/Pulsar; (coluna direita, acima) Haroldo Palo Jr./ Kino; (coluna central, abaixo) Luciano Candisani. 17.19 (A) Carlos Terrana / Kino; (B e C) Fabio Colombini/Kino; (D) Fabio Colombini - 17.20 (inferior, esquerda) Fausto Pires/Olhar Imagem - 17.21 (A) Haroldo Palo Jr./Kino; (B) Gilberto Martho - 17.22 (direita) Haroldo Palo Jr./Kino - 17.23 Assis Hoffmann/Kino - 17.24 (inferior, esquerda) Marcos Issa Olhar Imagem - 17.25 (direita) Haroldo Palo Jr./Kino - 17.26 (A e D) Haroldo Palo Jr./Kino; (B) Ricardo Cavalcanti/Kino; (C e E) Frans Lanting/Minden-Stock Photos; (abaixo) Juca Martins/Olhar Imagem - 17.27 (A) Haroldo Palo Jr./Kino; (B) Juca Martins/Pulsar; (C) Juca Martins/Olhar Imagem - 17.28 (A) Ricardo Cavalcanti/Kino; (B) Fabio Colombini; (C) Ivania Sant'Anna/Kino - 17.29 (esquerda) Márcio Lourenço/Pulsar; (direita) Fabio Colombini/Kino - 17.30 (A) Luciano Whitaker/Pulsar; (B) Haroldo Palo Jr./Kino - 17.32 (A) Lepus/ SPL-Stock Photos; (B) Douglas P. Wilson/Corbis-Stock Photos; (C) Brandon Cole/Corbis-Stock Photos; (D) CID. **Capítulo 18** • Abertura: Manoel Novaes/Pulsar - 18.1 Juda Ngwenya/Reuters-Newscom - 18.3 Isa/Kino; 18.4 Will McIntyre/Corbis-Stock Photos; 18.7 (A) Marcos Peron/Kino; (B) Evelson de Freitas/AE - 18.9 Jeremy Burgess/SPL-Stock Photos - 18.10 (A) Juca Martins/Pulsar; (B) Cynthia Brito/Pulsar - 18.11 (A) Fernando Favoretto; (B) Marcos Peron/Kino - 18.12 Maurício Simonetti/Pulsar - 18.13 (superior e inferior) José Mariano Amabis - 18.14 CID - 18.15 Mitsuaki Iwago/Minden-Stock Photos - 18.16 Fox Photos-Hulton Archive/Getty Images - 18.17 Glória Jafet/Kino - 18.19 (A) Ricardo Azoury/Pulsar; (B) Juca Martins/Olhar Imagem; (C) Manoel Novaes/Pulsar.

3 BIOLOGIA DAS POPULAÇÕES

Biologia das Populações aborda aspectos históricos, clássicos e modernos da Genética, da Evolução e da Ecologia. A obra divide-se em três partes:

• **Parte I – Genética**
Trata dos princípios genéticos e dos novos campos da Biotecnologia e da Engenharia Genética.

• **Parte II – Evolução biológica**
Trata dos principais processos evolutivos da vida e das bases da evolução humana.

• **Parte III – Ecologia**
Apresenta nosso planeta como um sistema integrado e discute a importância do conhecimento dos princípios ecológicos para a preservação dos ambientes da Terra.

ISBN 85-16-04326-6
9 788516 043261

Moderna